ارزیابی ریسک کیفی و ارزشیابی مواجهه شغلی کارکنان با عوامل شیمیایی در مشاغل صنعتی، کشاورزی و خدماتی



نویسندگان:

دکتر منصور رضازاده آذری

استاد گروه مهندسی بهداشت حرفه‌ای

دانشگاه علوم پزشکی آزاد اسلامی تهران

دکتر آتنا رفیعی پور

استادیار گروه مهندسی بهداشت حرفه‌ای و ایمنی کار

دانشگاه علوم پزشکی ایران

۱۴۰۳

سرشناسه: رضازاده آذری، منصور، ۱۳۲۹ -

عنوان و نام پدیدآور: ارزیابی ریسک کیفی و ارزشیابی مواجهه شغلی کارکنان با عوامل شیمیایی در مشاغل صنعتی، کشاورزی و خدماتی/نویسندگان منصور رضازاده‌آذری، آتنا رفیعی‌پور ؛ ویراستار انتشارات پژوهش ساوالان.

مشخصات نشر: تهران: وزارت بهداشت، درمان و آموزش پزشکی، انتشارات، ۱٤۰٤.

مشخصات ظاهری: ٤٦٢ ص.: مصور، جدول، نمودار.

شابک: ٦-٦٨-٥٩٦٤-٦٢٢-٩٧٨

ISBN : 978-622-5964-68-6

وضعیت فهرست نویسی: فیپا

یادداشت: کتابنامه.

موضوع: مواد شیمیایی -- پیش‌بینی‌های ایمنی
Chemicals -- Safety measures
محیط کار -- پیش‌بینی‌های ایمنی
Work environment -- Safety measures
بیماری‌های شغلی – پیشگیری
Occupational diseases -- Prevention
بهداشت صنعتی
Industrial hygiene
ایمنی صنعتی
Industrial safety

شناسه افزوده: رفیعی‌پور، آتنا، ۱۳٦۳-

شناسه افزوده: شرکت پژوهش ساوالان. انتشارات

شناسه افزوده: ایران. وزارت بهداشت، درمان و آموزش پزشکی. انتشارات

رده بندی کنگره: TP۱۵۰/پ۹

رده بندی دیویی: ٦٦۰/۲۸۰٤

شماره کتابشناسی ملی: ۱۰۰٦۹۰۰٦

اطلاعات رکورد کتابشناسی: فیپا

تاریخ درخواست: ۱٤۰٤/۰۲/۱۷

تاریخ پاسخگویی:

کد پیگیری: ۱۰۰٦۷۷۰۰

نوبت چاپ: اول

تاریخ انتشار: ۱٤۰٤

جمهوری اسلامی ایران
وزارت فرهنگ و ارشاد اسلامی

شماره‌پیگیری: ۲۵۸۷۴۲۰
تاریخ صدور: ۱۴۰۴/۰۲/۲۵

مجوز چاپ و انتشار کتاب

مشخصات کتاب

نام: ارزیابی ریسک کیفی و ارزشیابی مواجهه شغلی کارکنان با عوامل شیمیایی در مشاغل صنعتی، کشاور

نویسنده/نویسندگان: منصور رضازاده آذری , آتنا رفیعی پور

مترجم/مترجمان:

گردآورنده/مصحح/سایر نقش ها: گردآورنده(منصور رضازاده آذری , آتنا رفیعی پور)

قطع کتاب: وزیری — **تعداد صفحه:** ۴۰۳

رده سنی: بزرگسال — **شابک/شابم:** ۶-۶۸-۵۹۶۴-۶۲۲-۹۷۸

شناسه مجوز: ۹-۴۶۹۸۱-۹۴۹۲۴۰

مشخصات ناشر

نام ناشر: وزارت بهداشت درمان و آموزش پزشکی — **شماره پروانه نشر:** ۱۰۶۳۹

دفتر توسعه کتاب و کتابخوانی

بسم الله الرحمن الرحیم

مقدمه

مهندسی بهداشت حرفه‌ای به عنوان علم و هنر پیش‌بینی، شناخت، ارزشیابی و کنترل خطرات بهداشتی در محیط کار تعریف شده است. با توجّه به اصول یاد شده و نگارش کتب مختلف از سوی اساتید محترم، سؤالی که مطرح می‌شود این است که انگیزه نگارش این کتاب چه بوده و به چه دلیلی ارائه شده است. از دیدگاه نویسندگان کتاب و همچنین انجمن بهداشت صنعتی کشور آمریکا (AIHA)، با در نظر گرفتن چالش‌های رو به رشد سلامت کارکنان، به نظر می‌رسد که روش‌های سنتی پایش‌های بهداشت حرفه‌ای باید دگرگون شوند تا هدف اصلی این رشته، یعنی کنترل یا مدیریت ریسک کارکنان، سریع‌تر و با هزینه کمتری تحقق یابد.

در چند سال گذشته، کیفیت روش‌های کیفی ارزیابی مواجهه (Qualitative Exposure Assessment) و ارزیابی ریسک کیفی مواجهه شغلی (Qualitative Risk Assessment) برای اولویت‌بندی ترکیبات شیمیایی در برنامه ارزشیابی مواجهه کارکنان مورد توجّه قرار گرفته است. در برخی موارد، این روش‌ها حتی می‌توانند اقدامات کنترلی را توجیه کنند. از اهداف این کتاب، بازآموزی کارشناسان مهندسی بهداشت حرفه‌ای در انجام وظایف آلاینده‌سنجی سالیانه است. همچنین، این کتاب می‌تواند برای دروس رشته در دوره‌های کارشناسی، کارشناسی ارشد و دکترای تخصصی مهندسی بهداشت حرفه‌ای مورد استفاده قرار گیرد.

با توجّه به اینکه کتاب از طریق انتشارات وزارت بهداشت، درمان و آموزش پزشکی منتشر شده و به‌صورت رایگان در اختیار کارشناسان و دانش‌پژوهان محترم قرار می‌گیرد، انتظار نویسندگان از خوانندگان این است که در صورت مثبت دانستن محتوای کتاب، خدمات شایسته‌تری را برای کارکنان زحمتکش در بخش‌های مختلف شغلی ارائه دهند.

پیشگفتار

با توجّه به اهمیت پایش شغلی کارکنان در مواجهه با عوامل شیمیایی محیط کار، در این کتاب تلاش شده است تا الگویی کاری برای کارشناسان و دانشجویان در مقاطع کارشناسی و تحصیلات تکمیلی تدوین شود. ازآنجاکه هدف نویسندگان این کتاب بهینه‌سازی خدمات کارشناسان مهندسی بهداشت حرفه‌ای است، توصیه می‌شود محتوای آن از سوی نویسندگان به مسئولین فنی شرکت‌ها و کارشناسان ارشد وزارت بهداشت آموزش داده شود.

لازم به ذکر است که در فصول مختلف کتاب، مراحل پایش مواجهه شغلی کارکنان با عوامل شیمیایی بر اساس آخرین متون علمی تدوین شده و مطالب با ذکر مثال‌هایی کاربردی، به‌گونه‌ای ارائه شده‌اند که قابل استفاده در مجامع علمی و حرفه‌ای باشند. همچنین، تلاش شده است تا چالش‌های فنی و لجستیکی موجود در مسیر آلاینده‌سنجی تا حد امکان برطرف شود.

در این کتاب، از تجربیات و ابتکارات جدید در زمینه آلاینده‌سنجی محیط کار، به‌ویژه در مورد آلاینده‌های رایجی همچون سیلیس کریستالی، میست روغن، آزبست، ترکیبات آلی فرار، انواع مختلف فلزات و سایر ترکیبات آلی از جمله فرمالدئید و وینیل کلراید استفاده شده است. این تجربیات و ابتکارات، بر اساس تحقیقات و منابع منتشرشده توسط نویسندگان این کتاب ارائه شده‌اند. به‌طور کلی، این کتاب تألیفی و ترجمه‌ای دقیق از مراجع علمی به‌روز است که توسط سازمان‌های معتبر یا محققین برجسته این حوزه منتشر شده‌اند.

در این کتاب، دو روش ارزیابی کیفی مواجهه شغلی و ارزیابی ریسک کیفی در پایش شغلی کارکنان مورد توجّه قرار گرفته است. همچنین، روش‌های نوین نمونه‌برداری و آنالیز، به همراه معرفی روش‌های آماری و تفسیر داده‌های مواجهه شغلی کارکنان، با ذکر مثال‌هایی ارائه شده است.

نویسندگان این کتاب امیدوارند که این اثر مورد توجّه اساتید عالی‌قدر و کارشناسان محترم مهندسی بهداشت حرفه‌ای قرار گیرد و حاصل زحمات ارائه‌شده در این کتاب، موجب خیر و برکت برای کارکنان شریف وطنمان و کشورهای فارسی‌زبان شود.

در خاتمه، لازم می‌دانم از زحمات همکار ارزشمندم، سرکار خانم دکتر آتنا رفیعی‌پور، عضو هیئت علمی گروه مهندسی بهداشت حرفه‌ای دانشکده بهداشت دانشگاه علوم پزشکی ایران، سپاسگزاری نمایم. ایشان زحمات بسیار زیادی در تدوین و ویرایش مطالب فصول مختلف این کتاب متحمل شدند و با سؤالات ارزشمند خود، روان‌سازی مطالب را در دو سال اخیر میسر ساختند. بدون کمک ایشان، این کتاب نمی‌توانست به این شکل ارائه گردد.

دکتر منصور رضازاده آذری

مرداد ماه ۱۴۰۳

فهرست

صفحه

فصل ۱: مواجهه با ترکیبات شیمیایی مخاطره‌آمیز در محیط کار و اثرات آن بر سلامت از دیدگاه سازمان ILO

فصل ۲: شناسایی مخاطرات ترکیبات شیمیایی در مشاغل مختلف و طبقه‌بندی آنان بر اساس کدهای GHS

فصل ۳: ارزیابی کیفی مواجهه شغلی با ترکیبات شیمیایی

فصل ۴: ارزیابی ریسک کیفی مواجهه شغلی با ترکیبات شیمیایی

فصل ۵: روش‌های نمونه‌برداری از آلاینده‌های شیمیایی هوای محیط کار

فصل ۶: روش‌های تجزیه دستگاهی

فصل ۷: اعتبارسنجی روش‌های تجزیه

فهرست **صفحه**

فهرست	صفحه

فهرست حروف اختصاری

اختصارات	واژه کامل	شماره صفحه
AAS	Atomic Absorption Spectroscopy	۲۲۷
ACGIH	American Conference of Governmental Industrial Hygienists	۶۸
AES	Atomic Emission Spectroscopy	۲۲۶
AFS	Atomic Fluorescence Spectroscopy	۲۲۶
AIHA	American Industrial Hygiene Association	۳۷
ASGM	Artisanal and small-scale gold mining	۱۰
ATSDR	Agency for Substances Disease Registry	۳۶۱
BMI	Body Mass Index	۳۶۰
BTV	Break-Through Volume	۱۵۸
CAREX	(CARcinogen EXposure) provides knowledge about Canadians' exposures to known and suspected carcinogens where people live and work	۷
CAS	Chemical Abstracts Service	۱۶۷
CCA	Chromate Copper Arsenate	۷
CFD	Computational fluid dynamics	۴۴۸
CNC	Computer numerical control	۵۱
CV	Coefficient of Variation	۳۷۲
DALY	Disability-adjusted life year	۱۴
DFG	Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG, German Research Foundation)	۱۶۱
EDCs	Endocrine-disrupting Chemicals	۲۰
EDS	Endpoint determinant score	۲۱
Em	Equivalent Mixture	۴۵۶
ER	Exposure Rate	۹۱
FSOT	Fused Silica Open Tubular	۲۶۷
FT-IR	Fourier Transform Infrared Spectrometer	۱۶۰
GC	Gas Chromatography	۱۶۰
GC-ECD	Gas Chromatography Electron Capture Detector	۱۶۱
GC-FID	Gas Chromatography Flame Ionization Detector	۲۸۶
GC-MS	Gas Chromatography Mass Detector	۱۶۱
GHS	Globally Harmonized System of Classification and Labelling of Chemicals	۴۳
H Code	Hazard Code	۳۹۶
He	Helium	۲۶۲
HPLC	High-Performance Liquid Chromatography	۲۹۶
HR	Hazard Rate	۹۱
IARC	International Agency for Research on Cancer	۴
IC	Ion Chromatography	۱۶۶
ICP	Induced Coupled Plasma	۲۴۳

IOM	Institute of Occupational Medicine	۱۷۷
IRSST	Institut de recherche santé et en sécurité du travail	۴۵۱
ITCILO	The International Training Centre of the ILO (ITCILO)	۱۲
LC_{50}	Lethal concentration 50%	۹۶
LCL	Lower Confidence Limit	۴۵۰
LD_{50}	lethal Dose 50% mg/kg	۹۶
LOD	Limit of Detection	۱۵۹
LOQ	Limit of Quantitation	۱۵۹
MCE	Mixed Cellulose Ester	۲۲۳
MEK	Methyl Ethyl Ketone	۱۴۶
MNMs	Manufactured nanomaterials	۱۸
MOCA	4,4'-Methylenebis(2-chloroaniline)	۱۶۶
MS	Mass Detector	۱۶۱
MWCNTs	Multi-Walled Carbon Nanotubes	۲۵۰
N_2	Nitrogen	۲۶۲
NTD	Needle Trap Device	۲۸۵
NTP	National Toxicology Program	۹۷
OEL	Occupational exposure limit	۵۲
OES	Optical Emission Spectroscopy	۲۴۳
OSHA	Occupational Safety and Health Administration	۷
PCB	Polychlorinated biphenyl	۲۲
PCM	Phase Contrast Microscope	۳۴۴
PEL	Permissible Exposure Limit	۳۵۸
PFAS	Per- and poly-fluoroalkyl substances	۱۹
PFOA	Perfluorooctanoic acid	۱۹
PFOS	Perfluorooctane sulfonate	۱۹
PID	Photoionization Detector	۱۷۱
PLOT	Porous Layer Open Tubular	۲۶۶
PNOS	Particles Not Otherwise Specified	۱۸۶
POPs	Persistent organic pollutants	۴
ppm	Parts per million	۵۳
PTFE	Polytetrafluoroethylene	۱۶۵
PVC	Polyvinylchloride	۹
QEA	Qualitative Exposure Assessment	۵۹
QRA	Qualitative Risk Assessment	۸۷
SAE	Sampling and Analytical Error	۴۵۲
SCOT	Support Coated Open Tubular	۲۶۶
SD	Standard Deviation	۳۸۸
SDS	Safety data sheet	۵۱
SEG	Similar Exposure Group	۴۰

SEM	Scanning Electron Microscope	۳۶۰
SIFT-MS	Selected Ion Flow Tube Mass Spectrometry	۴۰۸
SOP	Standard Operating Procedure	۷۸
STEL	Short-Term Exposure Level	۱۴۲
TCE	Trichloroethylene	۱۵
TDI	Tolerable daily intake	۲۸۱
TEM	Transmission Electron Microscopy	۳۵۵
TLV	Threshold Limit Value	۵۲
TLV-C	Threshold Limit Value-Ceiling	۱۴۲
TLV-STEL	Threshold Limit Value-Short term Exposure Limit	۵۳
TLV-TWA	Threshold Limit Value-Time-weighted average	۵۲
UCL	Upper Confidence Limit	۴۵۰
UNEP	United Nations Environment Program	۲۷
URT	Upper Respiratory Tract	۱۲۴
WCOT	Wall-Coated Open Tubular	۲۶۶
WHO	World Health Organization	۵
XRD	X-Ray Diffraction	۲۲۱
XRF	X-Ray Fluorescence	۲۲۱

فصل ۱: مواجهه با ترکیبات شیمیایی مخاطره‌آمیز در محیط کار و اثرات آن بر سلامت از دیدگاه سازمان ILO

۱-۱) مقدمه

سهم مواد شیمیایی در بروز مخاطرات بهداشتی در کارکنان بخش‌های صنعتی، خدماتی و کشاورزی با افزایش تولید و استفاده از آن‌ها در محیط‌های کاری کشورهای مختلف مرتبط است که کارکنان را بیش‌ازپیش در معرض مواد شیمیایی خطرناک قرار می‌دهد و ممکن است پیامدهای نامطلوبی برای سلامت آن‌ها به دنبال داشته باشد.

به‌غیر از کارگران صنایع شیمیایی، تعداد بسیاری از نیروی کار در تمام بخش‌های اقتصادی در معرض مواد شیمیایی خطرناک و سمی قرار دارند. برآوردهای قبلی منتشرشده توسط ILO نشان می‌دهد که سالانه بیش از ۲,۷۸۰,۰۰۰ کارگر در سراسر جهان به دلیل شرایط کاری خود دچار مرگ زودرس می‌شوند که تقریباً ۱ میلیون از این مرگ‌ومیرها به دلیل مواجهه شغلی با ترکیبات شیمیایی مخاطره‌آمیز رخ می‌دهد. این آمار به معنای مرگ حداقل یک کارگر در هر ۳۰ ثانیه به دلیل مواجهه با مواد شیمیایی است (UN, 2018). با توجّه به وسعت این مشکل، بررسی جامع شواهد برای درک بهتر خطرات ناشی از مواد شیمیایی خطرناک و شناسایی اقدامات لازم برای محافظت از سلامت و ایمنی کارگران، به‌صورت جدی مورد نیاز است.

روند کاری برنامه‌های بهداشت حرفه‌ای و ایمنی شیمیایی با توجّه به رشد ثابت صنایع شیمیایی، که حدود ۴ تا ۴.۵ درصد در سال است، رو به افزایش بوده است (Raskin and Kemp-Benedict, 2002). ارزش فروش جهانی، ازجمله داروها، در سال ۲۰۱۷ به ۳.۴۷ تریلیون یورو رسید که صنعت مواد شیمیایی را به دومین بخش بزرگ تولید جهان تبدیل کرد. آسیا در حال حاضر منطقه‌ای است که بیشترین میزان تولید و مصرف مواد شیمیایی را به خود اختصاص داده است.

کارگران در تمامی مراحل صنعت شیمیایی و سراسر بخش‌های اقتصادی، ازجمله کشاورزی، معدن، ساخت‌وساز، تولید و خدمات، در معرض انواع مواد شیمیایی قرار دارند. خطرات شیمیایی، چه به‌صورت سنتی (مانند آزبست) و چه در قالب ترکیبات نوظهور (مانند نانومواد ساخته‌شده)، تهدیدی مستقیم برای سلامت کارگران بوده‌اند.

کارگران در تمامی مراحل صنعت شیمیایی و سراسر بخش‌های اقتصادی، ازجمله کشاورزی، معدن، ساخت‌وساز، تولید و خدمات، در معرض انواع مواد شیمیایی قرار دارند. خطرات شیمیایی، چه به‌صورت سنتی (مانند آزبست) و چه در قالب ترکیبات نوظهور (مانند نانومواد ساخته‌شده)، تهدیدی مستقیم برای سلامت کارگران بوده‌اند.

مواجهه با مواد شیمیایی شغلی می‌تواند منجر به اثرات حاد سلامتی، مانند مسمومیت با آفت‌کش‌ها یا بیماری‌های مزمن مانند سرطان شود. علاوه بر این، تولید، استفاده و ذخیره‌سازی مواد شیمیایی می‌تواند منجر به آتش‌سوزی و انفجار شود که صدمات کشنده و غیرکشنده‌ای را در مقیاس بزرگ به دنبال خواهد داشت. به‌عنوان مثال، نیترات آمونیوم نگهداری‌شده در یک انبار در شهر بیروت (آگوست ۲۰۲۰) منجر به یک سری انفجارهای زنجیره‌ای شد و جان بیش از ۲۰۰ نفر را گرفت و باعث جراحت بیش از ۷,۵۰۰ نفر شد. بیماری‌های غیرواگیر مانند بیماری‌های قلبی‌عروقی، سرطان و بیماری‌های تنفسی نیز یکی دیگر از نکات مهم هستند. در واقع، اکثریت قریب به اتفاق بیماری‌های غیرواگیر ناشی از کار هستند و افزایش خطر ابتلا به بیماری‌های غیرواگیر اغلب با مواجهه با مواد شیمیایی شغلی مرتبط تشخیص داده شده است. برآوردهای اخیر در مورد بیماری‌های غیرواگیر نشان داد که سرطان شغلی عامل ۲۷ درصد از ۲.۴ میلیون مرگ‌ومیر شغلی کارگران در سال است (Takala et al., 2014).



نتایج گزارش‌های علمی نشان می‌دهد که تعداد مرگ‌ومیرهای سالانه منتسب به سرطان شغلی از ۶۶۶,۰۰۰ مورد در سال ۲۰۱۱ به ۷۴۲,۰۰۰ مرگ در سال ۲۰۱۵ افزایش یافته است. این افزایش را می‌توان با متغیرهای

مختلفی مانند دستیابی به شواهد علمی در مورد سرطان‌زاهای جدید، روش‌های محاسبه تخمین تلفات، تغییرات در توزیع سنی کارگران و پیر شدن نیروی کار توضیح داد. بر اساس داده‌های ILO، تعداد سرطان‌های کشنده ناشی از کار سالانه افزایش می‌یابد. تنها در اتحادیه اروپا، سرطان شغلی مسئول ۱۰۲,۵۰۰ مرگ در سال ۲۰۱۱ و ۱۰۶,۳۰۰ مرگ در سال ۲۰۱۵ بوده است که این آمارها همچنان رو به رشد هستند.

تغییر در شیوه‌های کاری، جمعیت‌شناسی، فناوری و محیط‌زیست منجر به بروز نگرانی‌های جدیدی برای متخصصان رشته بهداشت حرفه‌ای و ایمنی شده است که با روند رو به رشد نابرابری مسائل شغلی کارگران در کشورهای مختلف دنیا و به‌ویژه مواجهه شغلی با مواد شیمیایی خطرناک مرتبط است. مشکلات گروه‌های خاصی از کارگران، مانند کارگران جوان، جمعیت‌های سالخورده، کارگران مهاجر، زنان و کارگران بخش‌های غیررسمی نیز احتمالاً به دلیل افزایش مواجهه با مواد شیمیایی خطرناک بوده است.

با توجّه به مشکلات موجود در زمینه سلامت کارگران و نیز متناسب با اهداف رشته بهداشت حرفه‌ای جهت حفاظت کارگران و کنترل مواجهه با ترکیبات شیمیایی، بررسی کامل برنامه‌های بهداشت شغلی کارگران به همراه ارزیابی و در شرایطی ارزشیابی مواجهه شغلی صحیح بهداشتی، لازم به نظر می‌رسد که در قدم آخر می‌بایست توجیه‌کننده اقدامات کنترلی محیط کار و ارتقای سطح سلامت در برنامه مدیریت ریسک شاغلین باشد و از این رو در این کتاب به ترتیب به این موارد پرداخته خواهد شد.

بر اساس مطالعات سازمان ILO، عمده مشکلات شاغلین به دلیل مواجهه با ترکیبات شیمیایی مخاطره‌آمیز به شرح زیر اتفاق می‌افتد:

- آزبست[1]
- سیلیس کریستالی[2]
- فلزات سنگین[3]
- ترکیبات آرسنیک[4]
- ترکیبات کادمیوم[5]
- ترکیبات کروم[6]

1 Asbestos
2 Crystalline Silica
3 Heavy Metals
4 Arsenic Compounds
5 Cadmium Compounds
6 Chromium Compounds

- ترکیبات سرب[۱]
- ترکیبات جیوه[۲]
- ترکیبات سرطان‌زا بر اساس گزارش سازمان بین‌المللی تحقیقات سرطان (IARC)[۳]
- سایر پیامدهای سلامتی بر اساس مواجهه با ترکیبات فلزی
- کروم شش ظرفیتی[۴]
- سمیت جیوه و متیل جیوه[۵]
- حلال‌های صنعتی
- سایر اثرات حلال‌ها در سلامت کارکنان
- مواد ساخته شده نانومتری[۶]
- ترکیبات پرفلوئورینه[۷]
- مواد شیمیایی مختل کننده غدد درون‌ریز[۸]
- ترکیبات POPs[۹] شامل آفت‌کش‌های ارگانوکلره
- ترکیبات آفت‌کش ارگانوفسفره[۱۰]

۱-۱-۱) آزبست

تخمین زده می‌شود که در حدود ۱۲۵ میلیون کارگر در محل کار خود در معرض مواجهه با آزبست باشند که ممکن است هنوز با مقدار واقعی مواجهه تفاوت داشته باشد. این آمارها نشان می‌دهد که مواجهه افراد با الیاف آزبست می‌تواند باعث مرگ سالیانه حدود ۲۳۳,۰۰۰ نفر از کارگران جهان شود.

[1] Lead Compounds
[2] Mercury Compounds
[3] International Agency for Research on Cancer (IARC)
[4] Hexavalent Chromium
[5] Mercury and Methylmercury
[6] Nanomaterials
[7] Perfluorinated Compounds
[8] Endocrine disrupters Compounds
[9] Persistent Organic Pollutants
[10] Organophosphate pesticide Compounds



مواجهه با الیاف آزبست می‌تواند باعث سرطان ریه و سرطان پرده جنب (مزوتلیوما) شود که مطالعات نشان داده‌اند سهم سرطان ریه بیشتر از سرطان پرده جنب است. سازمان جهانی بهداشت (WHO) برآورد نموده است که نسبت خطر ابتلا به سرطان ریه در مقایسه با مزوتلیوما در مواجهه مزمن با الیاف کریزوتیل در حدود ۶ به ۱ است.

۱-۱-۲) سیلیس کریستالی

سیلیس یا دی‌اکسید سیلیکون (SiO_2) یک ترکیب طبیعی از سیلیکون و اکسیژن است که بیشتر در ماسه یافت می‌شود. فراوان‌ترین شکل سیلیس، α-کوارتز است و واژه کوارتز اغلب به جای اصطلاح کلی سیلیس کریستالی استفاده می‌شود (Uhrlandt, 2006).

استنشاق سیلیس کریستالی منجر به طیف وسیعی از بیماری‌های مرتبط با ریه می‌شود و IARC به این نتیجه رسیده است که شواهد کافی وجود دارد که سیلیس کریستالی باعث سرطان ریه می‌شود. مواجهه با سیلیس کریستالی همچنین می‌تواند باعث سیلیکوزیس شود که یک بیماری ریوی پیشرونده طولانی‌مدت ناشی از رسوب ذرات ریز گرد و غبار سیلیس در حبابچه‌های ریوی است.

به‌طور تخمینی بیش از ۶۵,۰۰۰ مرگ در سراسر جهان در سال ۲۰۱۹ به دلیل مواجهه شغلی با سیلیس کریستالی رخ داده است و پیشگیری از مواجهه با سیلیس مؤثرترین راه برای محدود کردن عوارض و مرگ و میر مرتبط با سیلیس است (IHME, 2021). همچنین سازمان‌های WHO و ILO نظارت همیشگی بر وضعیت

سلامتی کارگرانی که در معرض سیلیس کریستالی هستند را توصیه کرده‌اند. از آنجایی که عمدتاً اطلاعات تفکیک جنسیتی وجود ندارد، این احتمال وجود دارد که مواجهه با سیلیس در مشاغل دارای فعالیت‌های دستی که عمدتاً شاغلین در این نوع فعالیت‌ها مردان هستند، گسترده‌تر باشد.

۱–۱–۳) فلزات سنگین

فلزات سنگین فلزاتی با چگالی بالا و در بسیاری از موارد خطرناک هستند که از آن جمله می‌توان به فلزات آرسنیک(As)، کادمیوم(Cd)، سرب(Pb)، جیوه (Hg) و کروم شش‌ظرفیتی (CrVI) اشاره کرد. مواجهه شغلی با فلزات سنگین و ترکیبات آن‌ها در طیف گسترده‌ای از مشاغل مانند ساخت و ساز، معدن، الکترونیک و صنعت نساجی رخ می‌دهد.

آرسنیک، کادمیوم و کروم شش‌ظرفیتی از سوی IARC به‌عنوان سرطان‌زای انسانی طبقه‌بندی شده‌اند، در حالی که سرب در دسته احتمالاً سرطان‌زا برای انسان قرار می‌گیرد. آرسنیک، کادمیوم، سرب و جیوه از سوی WHO به‌عنوان چهار ماده مهم مورد توجّه سلامت عمومی معرفی شده‌اند. محدودیت‌های شغلی در رابطه با استفاده از این مواد در چندین کشور وجود دارد، اگرچه هنوز هماهنگی بین‌المللی در مورد آن وجود ندارد. برخی فلزات سنگین مانند سرب و جیوه می‌توانند بر روی جنین اثر گذاشته و باعث اثرات نامطلوب در رشد کودکان شوند. از این‌رو، محافظت از زنان در برابر مواجهه شغلی با این ترکیبات بسیار مهم است.



۱-۱-۴) ترکیبات آرسنیک

آرسنیک بیشتر برای تولید مواد نگهدارنده چوب و ضد قارچ تولید می‌شود که می‌تواند منجر به آلودگی خاک، به ویژه آرسنات مس کروم‌دار (CCA)[۱] شود. تولید و استفاده از CCA در برخی کشورها ممنوع شده است، اما چوب‌های مورد استفاده همچنان حاوی ترکیب CCA هستند.

آرسنیک علاوه بر این، در صنایع داروسازی و شیشه‌سازی، ساخت آلیاژها، مواد نگهدارنده چرم، رنگدانه‌های حاوی آرسنیک، رنگ‌های ضد رسوب، طعمه‌های سمی و تا حدی در تولید مواد شیمیایی کشاورزی (به‌ویژه برای باغ‌ها و تاکستان‌ها) به کار می‌رود. این ترکیبات همچنین به میزان کمتری در صنایع میکروالکترونیک و اپتیک مورد استفاده قرار می‌گیرند. متن شما ویرایش شد و در صورت نیاز به تغییرات بیشتر، اطلاع دهید:

در سال ۲۰۱۹، استخراج تری‌اکسید آرسنیک از معادن به ۳۳,۰۰۰ تن رسید. دو کشور اصلی تولیدکننده آن، چین (۲۴,۰۰۰ تن) و مراکش (۶,۰۰۰ تن)، حدود ۹۰ درصد از تولید جهانی برآورد شده را به خود اختصاص داده‌اند. آرسنیک غیرآلی به‌طور طبیعی در سطوح بالایی در آب‌های زیرزمینی برخی کشورها از جمله آرژانتین، بنگلادش، شیلی، چین، هند، مکزیک و ایالات متحده یافت می‌شود. هیچ تخمین جهانی دقیقی از میزان مواجهه شغلی با آرسنیک وجود ندارد.

NIOSH تخمین زده است که بین سال‌های ۱۹۸۱ تا ۱۹۸۳، حدود ۷۰,۰۰۰ کارگر، از جمله تقریباً ۱۶,۰۰۰ کارگر زن، به‌طور بالقوه در معرض ترکیبات آرسنیک در محل کار قرار داشته‌اند. سازمان کانادایی CAREX نیز برآورد کرده است که ۱۴۷,۵۶۹ کارگر در اتحادیه اروپا بین سال‌های ۱۹۹۰ تا ۱۹۹۳ در معرض آرسنیک و ترکیبات آن بوده‌اند. همچنین، OSHA تخمین می‌زند که در حال حاضر حدود ۲۵,۰۰۰ کانادایی در محل کار خود با آرسنیک مواجهه دارند.

[1] chromated copper arsenate (CCA)

۱–۱–۵) ترکیبات کادمیوم

بیشترین پتانسیل مواجهه شغلی با کادمیوم در فعالیت‌هایی مانند تولید و پالایش کادمیوم، ساخت باتری‌های نیکل-کادمیم، فرمولاسیون و ساخت رنگدانه‌های کادمیوم، تولید آلیاژهای کادمیوم، آبکاری مکانیکی، ذوب روی، لحیم‌کاری با ترکیبات نقره-کادمیم و آلیاژهای فلزی، و همچنین تولید پلیمر وینیل کلراید گزارش شده است. بر اساس گزارش سازمان ILO در سال ۲۰۱۹، تولید جهانی کادمیوم از پالایشگاه‌ها به ۲۵,۰۰۰ متریک تن رسید. کشورهای چین (۸,۲۰۰ متریک تن)، جمهوری کره (۵,۰۰۰ متریک تن) و ژاپن (۱,۹۰۰ متریک تن) از تولیدکنندگان پیشرو جهانی بودند.

منابع ورود کادمیوم به جو از طریق فعالیت‌های انسانی شامل ذوب سنگ معدن فلزات غیرآهنی، احتراق سوخت‌های فسیلی، تولید فلزات آهنی، سوزاندن زباله‌های شهری و تولید سیمان است. هیچ برآورد جهانی دقیقی از میزان مواجهه شغلی با کادمیوم وجود ندارد. با این حال، پایگاه داده CAREX برآورد کرده است که بین سال‌های ۱۹۹۰ تا ۱۹۹۳، حدود ۲۰۷,۳۵۰ کارگر در اتحادیه اروپا در معرض ترکیبات کادمیوم قرار داشته‌اند. همچنین، CAREX کانادا تخمین زده است که ۳۵,۰۰۰ کانادایی در محل کار خود با کادمیوم مواجهه دارند.

۱–۱–۶) ترکیبات کروم

ترکیبات کروم شش‌ظرفیتی به‌طور گسترده در تولید رنگدانه برای رنگ‌های نساجی، رنگ‌ها، جوهرها، پلاستیک‌ها، مواد ضد خوردگی، مواد نگهدارنده چوب، تکمیل فلزات، آبکاری کروم و دباغی چرم استفاده می‌شوند. در سال ۲۰۱۹، استخراج جهانی کروم از معادن حدود ۴۴ میلیون تن بود. کشورهای آفریقای جنوبی (۱۷ میلیون تن)، ترکیه (۱۰ میلیون تن) و قزاقستان (۶.۷ میلیون تن) از تولیدکنندگان پیشرو جهانی بودند. (U.S. Geological Survey)

مواجهه شغلی با ترکیبات کروم شش‌ظرفیتی در صنایعی مانند تولید آلیاژهای کروم، جوشکاری فلزات، آبکاری الکتریکی، تولید و استفاده از ترکیبات حاوی کروم، کاتالیزورها، اسید کرومیک، عوامل برنزه‌کننده و آفت‌کش‌ها اتفاق می‌افتد. (IARC 2020)

سازمان CAREX برآورد کرده است که بین سال‌های ۱۹۹۰ تا ۱۹۹۳، حدود ۷۸۵,۶۹۲ کارگر در اتحادیه اروپا در معرض ترکیبات کروم شش‌ظرفیتی قرار داشته‌اند. همچنین، در کانادا برآورد شده است که ۸۳,۰۰۰ کانادایی به‌صورت شغلی در معرض این ترکیبات قرار دارند.

۱-۱-۷) ترکیبات سرب

سرب عمدتاً در تولید باتری‌ها، لوله‌ها و آلیاژها، و همچنین در پوشش کابل‌ها، رنگ‌ها، لعاب‌ها و مهمات مورد استفاده قرار می‌گیرد. در برخی کشورها، از سرب به‌عنوان عامل تثبیت‌کننده در پلی‌وینیل‌کلراید (PVC) و از کرومات‌های سرب به‌عنوان رنگدانه در پلاستیک‌های زرد استفاده می‌شود. در سال ۲۰۱۹، تولید جهانی سرب از معادن حدود ۴.۵ میلیون تن گزارش شد و چین با تولید ۲.۱ میلیون تن، بزرگ‌ترین تولیدکننده جهانی بود.

ساخت محصولات حاوی سرب می‌تواند منجر به مواجهه شغلی گسترده کارکنان شود. این مواجهه همچنین ممکن است در طول استفاده از ترکیبات حاوی سرب و برداشتن لایه‌های رنگ حاوی سرب، هنگام سنگ‌زنی، جوشکاری و برش مواد پوشش داده‌شده با رنگ‌های سرب‌دار در صنایع کشتی‌سازی، ساخت‌وساز و تخریب ساختمان‌ها، بازیافت PVC و سایر پلاستیک‌ها، و همچنین در ساخت و پرداخت ظروف کریستالی رخ دهد.

استخراج معادن، ذوب فلزات و بازیافت صنعتی و غیرصنعتی پسماندهای وسایل الکتریکی و الکترونیکی نیز از منابع مهم مواجهه با سرب هستند.

سرب به‌طور گسترده به شکل تترا اتیل و تترا متیل سرب به‌عنوان مواد عایق صدا و روان‌ساز در بنزین استفاده می‌شد که این امر باعث خروج ذرات سرب معدنی از اگزوز وسایل نقلیه می‌گردید. حذف تدریجی استفاده از سرب در بنزین در همه کشورها منجر به کاهش چشمگیر مواجهه و میانگین غلظت سرب در خون انسان شده است.

پایگاه داده CAREX تخمین زده است که بین سال‌های ۱۹۹۰ تا ۱۹۹۳، حدود ۱.۵ میلیون کارگر در اتحادیه اروپا در معرض سرب و ترکیبات آن قرار داشته‌اند. همچنین، CAREX کانادا برآورد کرده است که در حال حاضر حدود ۲۷۷,۰۰۰ کانادایی به‌صورت شغلی در معرض سرب هستند.

۱-۱-۸) ترکیبات جیوه

مواجهه شغلی با جیوه در شغل معدنکاری (به‌عنوان مثال در استخراج جیوه، استخراج طلا و استخراج فلزات دیگر مانند مس، روی و نقره) اتفاق می‌افتد. در سال ۲۰۱۹، تولید جهانی جیوه در نتیجه استخراج معادن در حدود ۴،۰۰۰ متریک تن بود و تولیدکننده پیشرو جهانی در این خصوص کشور چین (۳،۵۰۰ تن) معرفی شد.

تقریباً ۱۵ میلیون کارگر شاغل در استخراج دستی طلا در مقیاس کوچک (ASGM)[1] که در کشورهای در حال توسعه مشغول به فعالیت هستند، در معرض مواجهه با جیوه قرار می‌گیرند. از جیوه به‌عنوان کاتالیزور نیز استفاده می‌شود.

جیوه به‌عنوان کاتالیست در تولید مونومر وینیل کلراید استفاده می‌شود که می‌تواند منجر به ریسک مواجهه شغلی کارکنان با این فلز و ترکیبات آن شود. جیوه به‌طور طبیعی در پوسته زمین و در ذغال‌سنگ و نفت خام نیز یافت می‌شود و عامل ایجاد مواجهه شغلی کارکنان در نیروگاه‌های ذغال‌سنگ و فرآوری مواد نفتی است.

فنیل استات جیوه در فرآیند کاغذسازی به‌عنوان قارچ‌کش به خمیر سلولز اضافه می‌شود که می‌تواند منجر به مواجهه کارکنان با جیوه شود. علاوه بر این، جیوه جزئی از آمالگام دندان و منبع مواجهه شغلی پرسنل دندانپزشکی است. جیوه همچنین در آبکاری طلا و در ساخت صنایع دستی طلاکاری نیز استفاده می‌شود.

۱-۱-۹) سرطان‌زاهای فلزی در دسته‌بندی IARC

سازمان IARC نتیجه ابتکار گروهی از شخصیت‌های برجسته فرانسوی است که موفق شدند رئیس‌جمهور وقت کشور فرانسه، شارل دوگل[2] را متقاعد کنند تا پروژه‌ای را برای کاهش بار بیماری‌های سرطان در کشورهای مختلف آغاز نماید. (WHO, 2023) این پروژه به سرعت شتاب گرفت و IARC در ۲۰ مه ۱۹۶۵ با قطعنامه مجمع جهانی بهداشت به‌عنوان آژانس تخصصی بیماری‌های سرطان شکل گرفت. این آژانس در حقیقت یک نهاد تخصصی از WHO محسوب می‌شود و محل استقرار آن در شهر لیون، کشور فرانسه است.

[1] Artisanal and small-scale gold mining

[2] Charles de Gaulle

دورنمای سازمان IARC ترویج همکاری بین‌المللی در زمینه تحقیق بر روی سرطان است و فعالیت‌های تحقیقاتی آژانس حاصل تلاش‌های بین‌رشته‌ای و تخصص‌های اپیدمیولوژی، علوم آزمایشگاهی و آمار زیستی برای شناسایی علل سرطان و توصیه اقدامات پیشگیرانه برای کاهش بیماری و رنج ناشی از آن است. ویژگی مهم آژانس تخصص آن در هماهنگی تحقیقات بین کشورهای مختلف و سازمان‌ها است. نقش مستقل آن به‌عنوان یک سازمان بین‌المللی این فعالیت‌ها را تسهیل می‌کند. IARC توجّه ویژه‌ای به انجام تحقیقات در کشورهای با درآمد کم و متوسط از طریق مشارکت و همکاری با محققان در این مناطق دارد.

مأموریت سازمان IARC تأکید بر روشنگری در زمینه نقش عوامل خطر محیطی و سبک زندگی و بررسی تأثیر متقابل آنها با زمینه ژنتیکی در مطالعات جوامع است. با توجّه به مطالعات انجام‌شده، مشخص شده است که بیشتر سرطان‌ها به‌طور مستقیم یا غیرمستقیم با عوامل محیطی مرتبط هستند و می‌توانند قابل پیشگیری باشند.

برنامه مونوگراف‌های IARC (انتشار مطالب تخصصی برای عوامل سرطان‌زا) یکی از فعالیت‌های تخصصی اصلی از مجموعه فعالیت‌های آژانس است. این مونوگراف‌ها حاصل مطالعات گروه‌های متخصص بین‌المللی است که شواهد سرطان‌زایی مواجهه‌های خاص را ارزیابی و منتشر می‌کنند. آژانس همچنین متعهد به مطالعه رویکردهای تشخیص زودهنگام سرطان و ارزیابی راهبردهای پیشگیری است.

IARC نقش مهمی در توصیف بار سرطان در سراسر جهان دارد که این موضوع را از طریق همکاری و کمک به مراکز ثبت سرطان و نظارت بر تغییرات و روندهای جغرافیایی در طول زمان به انجام می‌رساند. این سازمان اقدام به انتشار مجموعه‌هایی تحت عنوان "شیوع سرطان پنج قاره"[1] نیز می‌کند.

[1] Cancer Incident in Five Continents

ارزیابی ترکیبات سرطان‌زا در گروه‌های مختلف توسط مرکز آموزش‌های بین‌المللی سازمان بین‌المللی کار انجام می‌شود.

ترکیبات شیمیایی، عوامل فیزیکی و بیولوژیکی دارای خطرات سرطان‌زایی برای انسان‌ها از سوی مرکز آموزش‌های بین‌المللی سازمان بین‌المللی کار (ITCILO)[1] در گروه‌های مختلف طبقه‌بندی شده‌اند که در ادامه به آنها اشاره شده است.

گروه ۱: عامل یا مجموعه‌ای از عوامل سرطان‌زای انسانی هستند. تعداد ۷۵ عامل سرطان‌زا در این گروه قرار می‌گیرند. برای دستیابی به اطلاعات بیشتر، می‌توانید بر روی عنوان گروه ۱ کلیک نمایید.

گروه ۲: گروه ۲ دارای دو زیر گروه است:

گروه A۲: عامل یا مجموعه‌ای از عوامل که احتمالاً برای انسان سرطان‌زا هستند. تعداد ۵۹ عامل احتمالاً سرطان‌زا در این گروه قرار می‌گیرند. برای دستیابی به اطلاعات بیشتر می‌توانید بر روی عنوان گروه A۲ کلیک نمایید.

گروه B۲: عامل یا مجموعه‌ای از عوامل که ممکن است برای انسان سرطان‌زا باشند. تعداد ۲۲۵ عامل با امکان سرطان‌زایی در این گروه قرار می‌گیرند. برای دستیابی به اطلاعات بیشتر می‌توانید بر روی عنوان گروه B۲ کلیک نمایید.

گروه ۳: عامل یا مجموعه‌ای از عوامل هستند که در شرایط مواجهه خاص ریسک سرطان‌زایی آن برای انسان قابل طبقه‌بندی نیست. تعداد ۴۷۴ عامل در این گروه قرار می‌گیرند. برای دستیابی به اطلاعات بیشتر می‌توانید بر روی عنوان گروه ۳ کلیک نمایید.

گروه ۴: عامل و یا مجموعه‌ای از عوامل که احتمالاً برای انسان سرطان‌زا نمی‌باشند. تعداد ۱ عامل در این گروه قرار می‌گیرد. برای دستیابی به اطلاعات بیشتر می‌توانید بر روی عنوان گروه ۴ کلیک نمایید.

پیامدهای سلامتی در اثر مواجهه با ترکیبات فلزات

مواجهه طولانی‌مدت شغلی با مقادیر زیاد از آرسنیک غیر آلی بر پوست تأثیر می‌گذارد. هایپرپیگمانتاسیون به‌عنوان شایع‌ترین اثر پوستی و هیپرکراتوزیس با ضخیم شدن دو طرفه پوست کف دست و پا از اثرات مواجهه با آرسنیک می‌باشد. سایر اثرات مواجهه با سطوح بالای آرسنیک غیر آلی شامل اثرات نوروپاتی اعصاب محیطی،

[1] The International Training Centre of the ILO (ITCILO)

علائم گوارشی، ورم ملتحمه، دیابت، اثر بر سیستم کلیوی، بزرگ شدن کبد، سرکوب فعالیت مغز استخوان، فشار خون بالا و بیماری قلبی عروقی می‌باشد. اکثر موارد مسمومیت حاد با آرسنیک در محیط‌های شغلی مرتبط با مصرف حشره‌کش‌ها یا آفت‌کش‌ها اتفاق می‌افتد (Ratnaike, 2003).

کلیه هدف اصلی کادمیوم است و این فلز عمدتاً در کلیه‌ها با نیمه عمر بیولوژیکی ۱۰-۳۵ سال برای انسان تجمع می‌یابد (WHO, 2010). نرمی استخوان[1]، پوکی استخوان و بیماری مزمن انسدادی ریه ممکن است از طریق زندگی در مناطق آلوده یا مواجهه شغلی در مقادیر زیاد و بلندمدت با کادمیوم واقع شود (WHO, ۲۰۱۰).

۱-۱-۱۰) ترکیب کروم شش ظرفیتی

مواجهه با کروم شش ظرفیتی می‌تواند باعث بروز آسم، تحریک پوستی، آسیب کلیه، آسیب کبد، احتقان و اِدم ریوی شود. برخی از کارگران نیز ممکن است در مواجهه با کروم دچار نوعی واکنش پوستی به نام درماتیت تماسی آلرژیک شوند (OSHA, 2006). یک مطالعه اخیر در صنایع دارای احتمال مواجهه با کروم شش ظرفیتی نشان داد که رشد و تکامل جفت جنین در زنان شاغل در این صنایع با مشکلاتی همراه بوده است (Banu et al., 2017).

مواجهه‌های شغلی مزمن با ترکیبات سرب در تراکم‌های کمتر از ۱۰ میکروگرم در دسی‌لیتر در خون بزرگسالان با اختلال در عملکرد کلیه، افزایش فشار خون، اثر بر سیستم اعصاب مرکزی و سیستم عصبی محیطی، اختلال عملکرد شناختی در مراحل بعدی زندگی و اثرات شناختی پنهان منتسب به مواجهه قبل از تولد همراه بوده است. (Banu et al., 2017). مطالعات اخیر نشان داده است که مواجهه شغلی با سرب منجر به افزایش خطر ابتلا به اسکلروز جانبی آمیوتروفیک[2] می‌شود (Meng et al., 2020). بر اساس تحقیقات انجام شده، تخمین زده شده است که مواجهه با سرب باعث مرگ ۱.۰۶ میلیون نفر و کیفیت نامطلوب زندگی در ۲۴.۴ میلیون نفر می‌شود (IHME, 2020). همچنین برآورد شده است که مواجهه محیطی با سرب در کشور

[1] Osteomalacia

[2] Amyotrophic Lateral Sclerosis

آمریکا مسئول ۲۵۶,۰۰۰ مرگ و میر در سال ناشی از بیماری‌های قلب و عروقی و ۱۸۵,۰۰۰ مرگ و میر ناشی از بیماری نارسایی خون به قلب می‌باشد (Lanphear et al., 2018).

۱-۱-۱۱) سمیت جیوه و متیل جیوه

استنشاق بخار جیوه می‌تواند برای سیستم عصبی مرکزی و محیطی زیان‌آور باشد و اثرات تخریبی و مرگباری بر سیستم‌های گوارشی و ایمنی، ریه‌ها و کلیه‌ها به همراه داشته باشد (Bernhoft, 2012). نمک‌های معدنی جیوه برای پوست، چشم و دستگاه گوارش خورنده هستند و ممکن است باعث مسمومیت دستگاه گوارش و کلیه‌ها گردند (Bernhoft, 2012).

مطالعه Gardner و همکاران نشان داد که مواجهه با ترکیبات جیوه در معدنکاران برزیل منجر به اختلال عملکرد خود ایمنی و التهاب سیستمیک می‌شود (Gardner et al., 2010). یک مرور سیستماتیک نیز ارتباط بین مواجهه با جیوه و افزایش فشار خون را گزارش کرده است (Hu et al., 2018). در سطح جهان، ۱۴ تا ۱۹ میلیون کارگر در قالب معدنکاران طلا مشغول به فعالیت هستند که از میان آنها حدود ۲۵ تا ۳۳ درصد (۳.۳ تا ۶.۵ میلیون معدنچی در سراسر جهان) از مسمومیت مزمن ناشی از مواجهه با بخار جیوه رنج می‌برند. بار جهانی ناشی از مسمومیت با ترکیبات جیوه بین ۱.۲۲ تا ۲.۳۹ میلیون DALY تخمین زده می‌شود.

۱-۱-۱۲) حلال‌ها

عبارت "حلال" یک کلمه کلی برای صدها ترکیب شیمیایی با قابلیت حل‌کنندگی مواد شیمیایی است. حلال‌ها برای حل کردن یا رقیق کردن مواد دیگر استفاده می‌شوند. حلال به مایعات آلی فراری گفته می‌شود که برای حل کردن یا رقیق کردن رنگ، چسب، پلاستیک، منسوجات، جوهر چاپ، محصولات کشاورزی و دارویی و ساخت صدها ترکیب آلی مورد استفاده قرار می‌گیرد. از نمونه‌های رایج حلال‌ها می‌توان به ایزوپروپانول، بنزن، تولوئن، زایلن و الکل‌ها اشاره کرد.



کارکنان در حین استفاده از حلال‌ها، به دلیل فرار بودن آن‌ها، در معرض مواجهه استنشاقی با این ترکیبات قرار می‌گیرند که به دلیل خصوصیت چربی‌دوستی، این ترکیبات می‌توانند به آسانی از طریق پوست جذب شده و اثرات زیان‌باری را در بدن ایجاد کنند. برخی از مشاغل با امکان بالای مواجهه با مقادیر زیادی از حلال‌ها شامل نقاشان، استفاده‌کنندگان از لاک، چاپگرها، کارگران خشکشویی، تولیدکنندگان کفش، انجام کارهای گرافیکی و محصولات پلاستیکی می‌باشند که بیشترین مواجهه را از راه استنشاق بخارهای حلال دریافت می‌کنند، اگرچه مواجهه از طریق تماس پوستی نیز امکان‌پذیر است. (Dick, 2006).

برخی فرایندهای شغلی مانند اسپری کردن، می‌توانند تراکم بسیار زیادی از حلال‌ها را در هوا ایجاد کنند. جذب خونی پس از مواجهه به سرعت اتفاق می‌افتد و تراکم ترکیبات در خون بسته به عوامل محیطی از قبیل تراکم حلال در هوا، وضعیت تهویه محیط و مدت زمان مواجهه تغییر می‌کند (Hurley and Taber, 2015). حلال‌ها همچنین ممکن است در اندام‌هایی با محتوای چربی بالا مانند مغز تجمع پیدا کنند و اثرات نامطلوب سلامتی را ایجاد نمایند.

اثرات حاد سلامتی در نتیجه مواجهه با تراکم بسیار زیاد از انواع حلال‌ها در هوا گزارش شده است. اثرات مواجهه مزمن با حلال‌ها نیز معمولاً به حلال‌های خاصی مرتبط است. اثرات حلال‌ها در بدن کارکنان مرتبط با نوع حلال، حساسیت فردی و تأثیر متغیرهایی مانند دُز و مدت زمان مواجهه با مواد شیمیایی متفاوت است.

سازمان IARC، بنزن و تری‌کلرواتیلن (TCE) را به‌عنوان ترکیبات سرطان‌زا برای انسان طبقه‌بندی کرده است (گروه ۱) و برخی از انواع حلال‌ها، به‌عنوان مثال حلال متیلن‌کلراید و تتراکلرواتیلن، احتمالاً سرطان‌زا

(گروه ۲A) هستند. بنزن به‌طور خاص با سرطان خون (WHO, 2019) و هیدروکربن‌های کلردار با سرطان کلیه مرتبط هستند (Brüning et al., 2003). افزایش آسیب‌های مختلف دستگاه گوارش و سرطان نیز به دنبال مواجهه با تولوئن گزارش شده است و کارکنان دارای مواجهه قابل‌ملاحظه با تولوئن (برای مثال نقاشان) با افزایش ۴۰ درصدی خطر ابتلا به سرطان ریه مواجه هستند.

شواهدی مبنی بر افزایش خطر ابتلا به سرطان کبد و لنفوم غیر هوچکین[1] به دنبال مواجهه با تری‌کلرواتیلن، سرطان مری و دهانه رحم در مواجهه با تتراکلراتیلن و همچنین بروز تومورهای بدخیم لنفوهماتوپوئیتیک پس از مواجهه با تتراکلریدکربن مشاهده شده است. افزایش ریسک ابتلا به سرطان کبد و مجاری صفراوی در مطالعه گروهی از کارکنان با میزان زیادی از مواجهه با متیلن‌کلراید اشاره شده است. (Lynge et al., 1997).

۱-۱-۱۳) اثرات غیر سرطان‌زایی حلال‌ها بر سلامت کارکنان



از پیامدهای مهم سلامتی غیر از سرطان‌زایی در مواجهه کارکنان با حلال‌های مختلف می‌توان به آسیب‌های سیستم عصبی، کلیه و کبدی، ضایعات پوستی و اثرات تولید مثلی مانند تغییر در تعداد اسپرم اشاره کرد. همچنین تقریباً همه حلال‌ها می‌توانند دارای تأثیر جانبی بر سلامت جنین مانند شکاف کام[2]، سقط جنین، عفونت نوزاد و سرطان دوران کودکی باشند (Rim, 2017). اثرات دیگر در تماس زیاد با حلال‌ها شامل آسیب

[1] lymphoma non-Hodgkin’s
[2] cleft palates

پوستی، چشمی و تحریک ریه، سردرد، حالت تهوع، سرگیجه و سبکی سر می‌باشد (ILO, 2004). مواجهه با حلال‌ها می‌تواند منجر به بیهوشی، تشنج و حتی مرگ نیز شود (Dick, 2006).

مطالعه موردی: ارتباط بین مواجهه شغلی با حلال و عملکرد شناختی در یک مطالعه در کشور فرانسه

در این مطالعه، تأثیر مواجهه شغلی با حلال‌ها بر عملکرد شناختی در مشاغل مختلف بر روی بیش از ۴۰،۰۰۰ شرکت‌کننده ۴۵ تا ۶۹ ساله ارزیابی شد. عملکرد شناختی شامل حافظه کلامی، توانایی گفتاری و عملکرد اجرایی با استفاده از آزمون‌های استاندارد شده شناختی مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که مردانی که به‌طور شغلی در معرض مواجهه با بنزین، الکل سفید یا تینر سلولزی قرار داشتند، بیشتر در معرض خطر ابتلا به اختلالات شناختی بودند، در حالی که زنان با بیش از ۲۰ سال مواجهه با الکل سفید، دارای عملکرد شناختی ضعیف‌تری بودند. عملکرد شناختی کارکنان با افزایش مدت زمان مواجهه با حلال‌ها و تعداد حلال‌ها کاهش یافت (Letellier et al., 2020).

مصرف رنگ‌های مصنوعی در صنایع مختلفی مانند نساجی، چرم، داروسازی، مواد غذایی و آرایشی در حدود ۹ میلیون تن در سال گزارش شده است. رنگ‌های آزو[1]، متداول‌ترین رنگ‌های مورد استفاده در صنایع هستند که از مشتقات هیدروکربنی معطر از بنزن، تولوئن، نفتالین، فنل و آنیلین تشکیل شده‌اند. رنگ‌های آزو و محصولات جانبی آن، مانند آمین‌های معطر، با بروز سرطان‌های مختلف و واکنش‌های آلرژیک مرتبط هستند. زنان در محل کار غالباً در معرض رنگ‌ها قرار می‌گیرند و بنابراین احتمال پیامدهای نامطلوب سلامتی، به‌ویژه هنگام بارداری، در آنها بیشتر است.

[1] Azo

۱-۱-۱۴) مواد ساخته شده نانومتری





نانومواد ساخته شده (MNMs)[1] به‌عنوان موادی تعریف می‌شوند که حداقل یکی از ابعاد آنها (ارتفاع، عرض یا طول) کوچکتر از ۱۰۰ نانومتر باشد.

با این حال، آنها را می‌توان بر اساس ماهیت شیمیایی ترکیب، گروه‌بندی نمود. در سنوات اخیر، افزایش تولید MNMs و کاربرد آن در صنایع و محصولات مختلف توجّه متخصصان بهداشت و ایمنی را برای ارزیابی جامع این ترکیبات به خود معطوف کرده است. مخاطرات شغلی مواجهه با ترکیبات MNMs می‌تواند از طریق استنشاقی، گوارشی و جذب پوستی ایجاد شود. نانولوله‌های چند جداره کربنی[2] و دی‌اکسید تیتانیوم به‌عنوان سرطان‌زای کلاس 2B از سوی IARC معرفی شده‌اند. از مسمومیت‌های دیگر نانومواد می‌توان به اثرات خاص آنها بر برخی اعضای بدن و بعد از مواجهه درازمدت اشاره کرد.

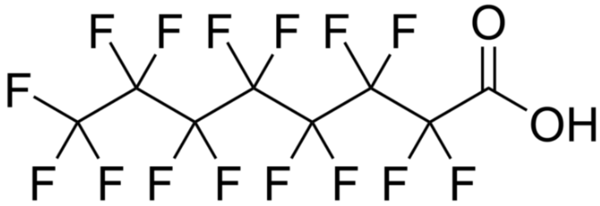
افزایش اخیر در تولید و استفاده از MNM ها در طیف گسترده‌ای از صنایع و محصولات، نیاز به ارزیابی جامع اثرات آن‌ها بر سلامت و ایمنی کارکنان را برجسته می‌کند. انسان‌ها از دیرباز در معرض تماس با نانومواد‌ها بوده‌اند، ولی گسترش سریع نانوتکنولوژی در سال‌های اخیر، ریسک مواجهه با MNM ها را افزایش داده است. این در حالی است که هنوز اثرات سلامتی مواجهه با آن‌ها ناشناخته است.

---

[1] Manufactured nanomaterials (MNMs)

[2] Multi-walled carbon nanotubes

۱-۱-۱۵) مواد پرفلوئورینه



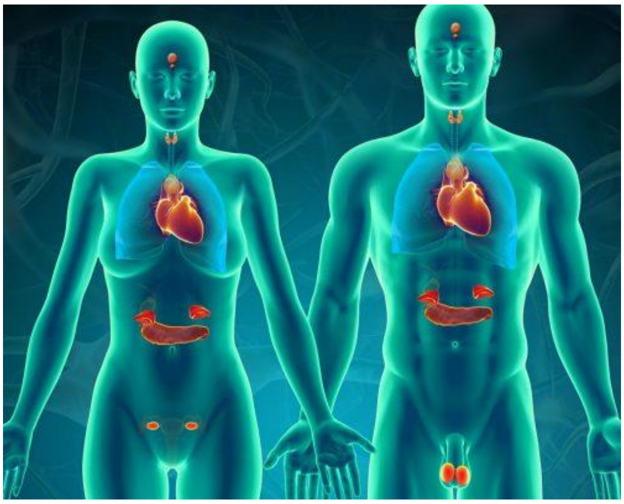
مواد شیمیایی پرفلوئورینه (PFAS)[۱] که برای اولین بار در دهه ۱۹۳۰ تولید شدند، شامل بیش از ۴۷۳۰ ماده شیمیایی مصنوعی است که حاوی اتم‌های فلوئور متصل به یک زنجیره کربنی است. پرفلوئورواکتانوئیک اسید[۲] و سولفونات پرفلوئورواکتان[۳] برای مدت‌های طولانی تولید و مصرف شده‌اند و بیشترین مطالعات تا به امروز در مورد آنها انجام شده است. این ترکیبات در طیف گسترده‌ای از محصولات از جمله منسوجات، محصولات کاغذی، مواد غذایی، نیمه‌هادی‌ها، قطعات خودرو، هوا و فضا، ظروف آشپزی، بسته‌بندی مواد غذایی، لباس‌های ضد لکه و فوم‌های آتش‌نشانی استفاده شده‌اند.

مواجهه شغلی با ترکیبات PFAS با بروز انواع سرطان‌ها مرتبط است و همچنین این ترکیبات منجر به اختلالات عملکرد سیستم ایمنی، عملکرد غدد درون‌ریز و رشد غیرطبیعی سینه می‌شوند. جنسیت می‌تواند یک عامل مؤثر بر تأثیرپذیری از PFAS باشد، ولی با توجّه به کاربرد گسترده ترکیبات PFAS، تفکیک ارزیابی اثرات سلامتی آن‌ها بر اساس جنسیت دشوار است. مطالعات مختلف نشان داده‌اند که سطوح بالایی از ترکیب PFAS در خون آتش‌نشانان زن و مرد وجود دارد.

---

[1] Perfluorinated (PFAS)
[2] Perfluorooctanoic acid (PFOA)
[3] perfluorooctane sulfonate (PFOS)

۱-۱-۱۶) ترکیبات شیمیایی با اثرات مخرب بر سیستم غدد درون‌ریز



سیستم غدد درون‌ریز، شبکه‌ای از غدد و اندام‌هایی است که هورمون‌ها را تولید، ذخیره و ترشح می‌کنند. در زمان عملکرد طبیعی، سیستم غدد درون‌ریز با سایر سیستم‌های فیزیولوژیک بدن به‌طور هماهنگ کار می‌کند تا رشد و عملکرد سالم بدن را در طول زندگی تنظیم کند. ترکیبات شیمیایی با اثرات مخرب بر سیستم غدد درون‌ریز (EDC)[1] می‌توانند در دُزهای بسیار کم بر عملکرد سیستم غدد درون‌ریز تأثیر بگذارند و باعث بروز اثرات نامطلوب سلامتی در باروری (مانند تغییر در مورفولوژی، فیزیولوژی، رشد، نمو، تولید مثل یا طول عمر جنین) شوند.

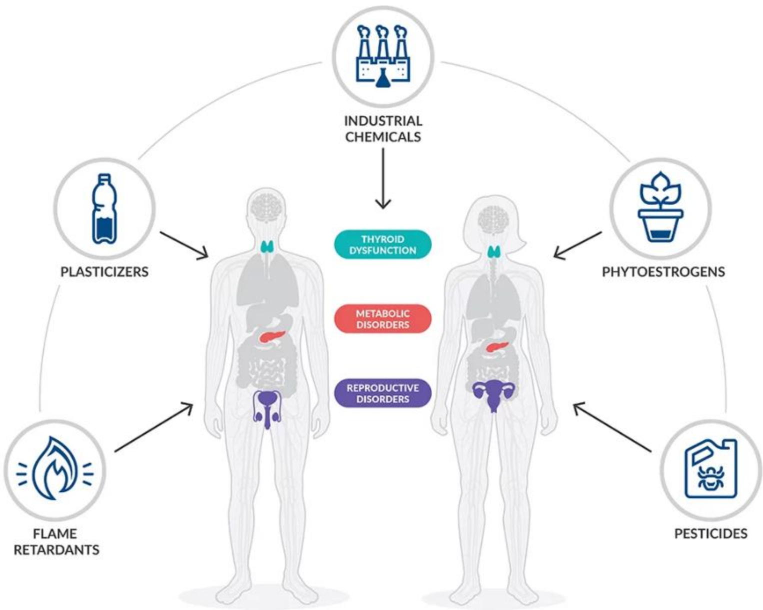
مواد شیمیایی مختل‌کننده غدد درون‌ریز (EDCs) موادی در محیط (هوا، خاک یا آب)، منابع غذایی، محصولات مراقبت شخصی و دیگر محصولات تولید شده هستند که با عملکرد طبیعی سیستم غدد درون‌ریز بدن تداخل دارند. از آنجایی که EDC ها از منابع مختلفی ایجاد می‌شوند، افراد به روش‌های مختلف مانند تنفس هوا، خوردن غذا و نوشیدن آب، در معرض تماس با آنها قرار می‌گیرند. EDC ها همچنین می‌توانند از طریق پوست وارد بدن شوند.

EDCها به مواد شیمیایی یا مخلوطی از مواد شیمیایی گفته می‌شود که در عملکرد هورمون‌های بدن اختلال ایجاد می‌کنند. برخی از EDC ها که از لحاظ ساختاری شبیه به هورمون‌ها هستند، بدن را فریب می‌دهند و به‌عنوان هورمون تلقی می‌شوند و از این طریق مانع از انجام کار هورمون‌های طبیعی بدن می‌شوند.

[1] Endocrine-disrupting Chemicals (EDCs)

سایر EDC ها می‌توانند با تأثیر بر نحوه ساخت، تجزیه یا ذخیره شدن آنها در بدن، سطح هورمون‌ها را در خون افزایش یا کاهش دهند. در نهایت، سایر EDC ها می‌توانند میزان حساسیت بدن را به هورمون‌های مختلف تغییر دهند.

EDC ها می‌توانند در فعالیت بسیاری از هورمون‌های مختلف بدن ایجاد اختلال کنند. به همین دلیل است که آنها با پیامدهای نامطلوب سلامتی انسان از جمله تغییر در کیفیت و باروری اسپرم، ناهنجاری در اندام‌های جنسی، اندومتریوز، بلوغ زودرس، تغییر عملکرد سیستم عصبی، نقص عملکرد سیستم ایمنی، سرطان‌های خاص و مشکلات دستگاه تنفسی مرتبط هستند. مشکلات متابولیکی، دیابت، چاقی، مسائل قلبی عروقی، اختلال در رشد، ناتوانی‌های عصبی و یادگیری و غیره نیز می‌تواند در اثر دریافت ترکیبات EDC پدید آید.



شکل ۱-۱) طرح شماتیکی از اثرات EDC ها بر بدن انسان

ترکیبات EDS در ایالات متحده بیشتر به‌عنوان مواد بازدارنده شعله استفاده می‌شوند، در حالی که آنها در اروپا برای تولید آفت‌کش‌های ارگانوفسفره به کار می‌روند (Trasande et al., 2016, Attina et al., 2016). اثرات طولانی‌مدت مواجهه با EDC ها نگران کننده است، زیرا بسیاری از آنها می‌توانند کارگران را حتی چندین دهه پس از قطع مواجهه با این ترکیبات، تحت تأثیر قرار دهند. این اثرات در مورد بی‌فنیل‌های

پلی‌کلرینه (PCB)[1] نیز صدق می‌کند، حتی با وجود اینکه تولید آنها در سراسر جهان در دهه ۱۹۷۰ ممنوع شد امّا همچنان احتمال مواجهه با این ترکیبات وجود دارد و به دلیل پایداری زیستی آنها هنوز کارکنان در معرض تماس با این ترکیبات هستند (Gioia et al., 2014, Ma et al., 2018).



تشخیص و پیشگیری

مواجهه با ترکیبات گروه EDC در طول رشد جنین و دوران کودکی می‌تواند اثرات طولانی‌مدت سلامتی به دنبال داشته باشد، زیرا هورمون‌ها در دوره‌هایی از زندگی، رشد و بلوغ اندام‌ها را تنظیم می‌کنند. مواجهه با این ترکیبات در اوایل زندگی با ناهنجاری‌های رشدی مرتبط است و ممکن است خطر ابتلا به انواع بیماری‌ها را در مراحل بعدی زندگی افزایش دهد. نکته مهم این است کهEDC های مختلف از جفت عبور کرده و در سیستم گردش خون جنین متمرکز می‌شوند. سایرEDC ها می‌توانند از طریق شیر از مادر به نوزاد منتقل شوند.

در مورد اثرات ترکیباتEDC ، حتی اگر برخی از اثرات سلامتی به‌طور کامل ثابت نشده باشند، انجام اقدامات احتیاطی عاقلانه است. لذا شناخت ترکیبات EDC که ممکن است افراد در مواجهه با آن‌ها قرار گیرند، ضروری به‌نظر می‌رسد. می‌بایست از مواجهه غیرضروری و قابل پیشگیری با محصولات مصرفی حاوی ترکیبات EDC اجتناب گردد. در ادامه، فهرستی از اقدامات پیشگیرانه برای به حداقل رساندن مواجهه با ترکیبات

[1] Polychlorinated biphenyl (PCB)

EDCارائه شده است. این اقدامات احتیاطی به‌ویژه در دوران بارداری یا برنامه‌ریزی برای فرزندآوری بسیار مهم است.

غذا و آب

- در مورد اینکه کدام ماهی‌ها برای مصرف بی‌خطر هستند، با راهنمایان محلی مشورت کنید.
- چربی گوشت و پوست ماهی را جدا کنید و با استفاده از توری بپزید تا چربی تخلیه شود.
- میوه‌ها و سبزیجات را قبل از مصرف کاملاً بشویید.
- ظروف پلاستیکی مواد غذایی را در مایکروویو قرار ندهید و از آن‌ها برای نگهداری مایعات داغ استفاده نکنید.
- مصرف غذاهای کنسرو شده و فرآوری شده را کاهش دهید.
- در صورت امکان از ظروف شیشه‌ای، چینی یا فولادی ضد زنگ، مخصوصاً برای غذاها و نوشیدنی‌های گرم، استفاده کنید.
- استفاده از فیلتر آب را در نظر بگیرید.
- در صورت امکان، محصولات ارگانیک، گوشت و لبنیات را خریداری کنید.
- ظروف نچسب قدیمی را با ظروف جدیدتر با روکش سرامیکی جایگزین کنید.
- از یک رژیم غذایی با تنوع زیاد استفاده کنید.
- وعده‌های غذایی بیشتری را در خانه تهیّه کنید و بر مواد تازه تأکید کنید.

ورزش و فعالیت

- کیفیت هوا را در منطقه خود بررسی کنید و در روزهای آلوده از انجام فعالیت‌های سنگین اجتناب کنید.
- از ورزش در نزدیکی مناطق پر تردد خودداری کنید. مسیرهایی را به دور از جاده‌های شلوغ و وسایل نقلیه انتخاب کنید.
- برچسب‌ها را بخوانید و از محصولات حاوی فتالات[1] اجتناب کنید.
- محصولاتی را با برچسب "بدون پارابن"[2] انتخاب کنید.

پارابن (Paraben) نام ترکیبی است که اغلب در مقادیر کم به‌عنوان نگهدارنده در وسایل آرایشی، دارویی، غذاها و آشامیدنی استفاده می‌شود. ترکیبات پارابن اغلب به‌صورت ترکیبات methylparaben ، ethylparaben،

[1] Phthalate

[2] Paraben

propylparabenو butylparaben استفاده می‌شوند. در اغلب موارد بیش از یک پارابن در یک محصول استفاده می‌شود.

- از مصرف عطرها خودداری کنید و لوازم آرایشی با برچسب "بدون عطر مصنوعی" و "فقط با اسانس معطر" انتخاب کنید.
- دست‌های خود را، به‌ویژه قبل از تهیّه و خوردن غذا، بشویید.
- استفاده از کاغذ رسیدهای کامپیوتری و کاغذ حرارتی را به حداقل برسانید.

مواد شیمیایی در منازل

- برای کسانی که پمپ شناور در چاه خود دارند و در صورت وجود یک لایه روغنی یا بوی سوخت در آب چاه خود، وضعیت کاری مطلوب پمپ باید بررسی شود. در صورت آلودگی چاه آب، اطلاعات در مورد نحوه تمیز کردن آن را از اداره بهداشت عمومی محل خود پرسش نمایید.
- لامپ‌های فلورسنت قدیمی و مصالح ساختمانی فرسوده ساختمان‌های قدیمی را برای دفع صحیح به مؤسسات خاص تحویل دهید.
- سوزاندن چوب یا زباله را به حداقل برسانید.
- از چمن‌زن با نیروی دستی یا برقی به جای بنزینی استفاده کنید.
- استعمال دخانیات در داخل خانه را ممنوع کنید و از اقداماتی برای حفظ اماکن بدون دخانیات در فضاهای عمومی حمایت کنید.
- طبقات خود را به‌طور مرتب تمیز کنید و گرد و غبار را از خانه خود پاک کنید.
- درختانی بکارید که گازها و ذرات معلق در هوا را فیلتر می‌کنند.

ملاحظات برای کودکان

- از خرید یا پذیرش اسباب‌بازی‌های پلاستیکی دست دوم خودداری کنید.
- از بطری‌های شیر خشک و اسباب‌بازی‌هایی که دارای برچسب بدون BPA هستند، استفاده کنید.

حمل و نقل

- گزینه‌های حمل و نقل و یا مسیرهای حمل و نقل را طوری انتخاب کنید که زمان سپری شدن در ترافیک محدود شود.
- زمان روشن بودن موتور بدون حرکت را کاهش دهید.

دیگر مسیرهای مواجهه احتمالی

• مواد شیمیایی و آفت‌کش‌های صنعتی می‌توانند به خاک و آب‌های زیرزمینی نفوذ کنند و با تجمع در ماهی‌ها، حیوانات و انسان‌ها به زنجیره غذایی راه پیدا کنند. از این‌رو محصولات غیرارگانیک می‌توانند دارای باقیمانده آفت‌کش‌ها باشند.

• برخی از محصولات شیمیایی مصرفی حاوی EDC هستند یا در ظروفی بسته‌بندی می‌شوند که می‌توانند باعث انتشارEDC ها شوند که از میان آن‌ها می‌توان به مواد شیمیایی خانگی، پارچه‌های آغشته به بازدارنده‌های شعله، لوازم آرایشی، لوسیون‌ها، محصولات دارای عطر و صابون‌های ضدباکتری اشاره کرد.

• غذاهای فرآوری‌شده می‌توانند حاوی مقادیری ازEDC ها باشند. این مواد شیمیایی می‌توانند در هنگام ساخت، پردازش، حمل و نقل و ذخیره‌سازی مواد وارد محصول شوند.

• محصولات دارنده سویا حاوی مواد فیتواستروژن هستند و این ماده شیمیایی تولیدشده توسط گیاهان در حقیقت شبیه‌ساز استروژن هستند و می‌توانند مشابه باEDC ها در عملکرد غدد درون‌ریز اختلال ایجاد کنند.

• گرد و غبار خانگی می‌تواند حاویEDC هایی مانند سرب، مواد بازدارنده شعله وPCB های ناشی از هوازدگی مصالح ساختمانی یا مبلمان باشد.

جدول ۱-۱) ترکیبات EDC و کاربرد آنها

ترکیبات مختل‌کننده عملکرد غدد درون‌ریز (EDCs)	کاربرد ترکیبات (EDCs)
DDT, Chlorpyrifos, Atrazine, 2, 4-D, Glyphosate	حشره‌کش‌ها
Lead, Phthalates, Cadmium	اسباب بازی‌های کودکان
Polychlorinated biphenyls (PCBs) and Dioxins	حلال‌های صنعتی و یا روان‌کننده و محصولات تولید شده جانبی ناشی از احتراق زباله‌ها
Bisphenol A (BPA), Phthalates, Phenol	پلاستیک‌ها و ظروف بسته‌بندی غذا
مواد باز دارنده شعله حاوی ترکیبات **Brominated Flame Retardants, PCBs**	وسایل الکترونیک و مصالح ساختمانی
لوسیون‌های ضد آفتاب حاوی **Phthalates, Parabens**	وسایل متداول بهداشتی و مراقبت‌های فردی، لوله‌های پلاستیکی در پزشکی و لوسیون‌های ضدآفتاب
Triclosan کریستال سفید با فرمول $C_{12}H_7Cl_3O_2$ با کاربرد وسیع در محصولات ضد باکتری (صابون، مواد دافع بو، دهان‌شویه و خمیر دندان)	صابون‌های ضد باکتری سفیدکننده دندان به نام **Colgate Total**
Perfluorochemicals	منسوجات، پوشاک، بسته‌بندی مواد غذایی نچسب، کیسه‌های پاپ کورن مایکروویو، ظروف تفلون قدیمی

تحقیقات بیشتری در موردEDC ها نیاز است، ولی هم‌اکنون اطلاعاتی به‌شرح زیر از ترکیبات EDC در دسترس می‌باشد:

پاسخ به استرس‌های روانی

- تغییرات عصبی و رفتاری
- کاهش توانایی در مدیریت استرس

متابولیسم

- برخی از EDC ها با چاقی و دیابت نوع ۲ مرتبط هستند.
- برخی از مواد شیمیایی صنعتی و بازدارنده‌های شعله می‌توانند در عملکرد تیروئید اختلال ایجاد کنند.

تولید مثل

- برخی از ترکیبات شیمیایی EDC (DDT، BPA، فتالات‌ها، PCBs و ...) می‌توانند با تقلید یا مسدود کردن اثرات هورمون‌های جنسی مردانه و زنانه، سلامت باروری را تحت تأثیر قرار دهند.

رشد و توسعه جسمانی

- مواجهه زیاد با EDC ها در طول بارداری می‌تواند منجر به وزن کم جنین هنگام تولد شود.
- کاهش رشد جسمانی
- اختلال در رشد جنسی
- ضعف سیستم ایمنی

سرطان

مواجهه با استروژن یا EDC های تقلید کننده آندروژن‌ها (هورمون‌های جنسی) می‌تواند باعث رشد سرطان سینه و پروستات شود و یا در درمان هورمونی سرطان تداخل ایجاد کند.

مواجهه قبل از تولد با برخی از EDC ها ممکن است باعث افزایش خطر ابتلا به سرطان پستان پس از رشد غدد پستانی شود. (Ruiz and Patisaul, 2024).

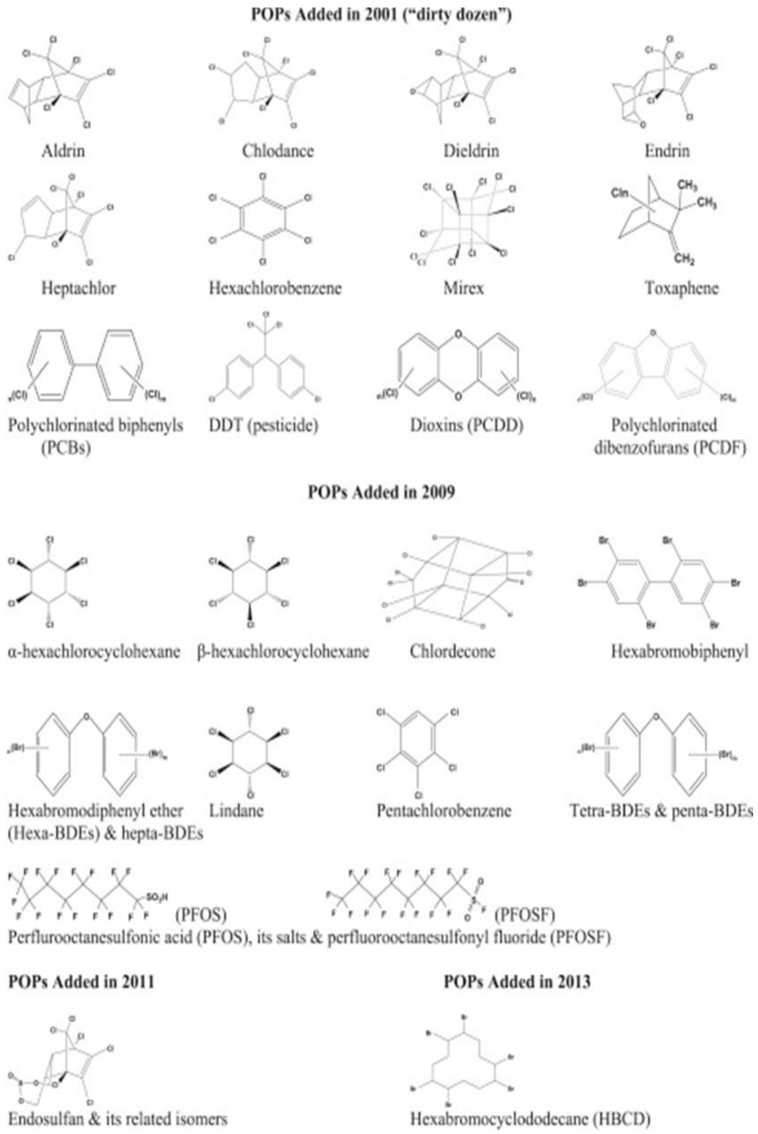
۱-۱-۱۷) ترکیبات آلی پایدار

آلاینده‌های آلی پایدار (POPs)[1] مواد شیمیایی زیست انباشته و سمی هستند که در برابر تخریب در محیط مقاوم هستند و می‌توانند مسافت‌های زیادی را طی بکنند و پتانسیل ایجاد اثرات نامطلوب بر سلامت محیط و انسان را دارند. تلاش‌ها برای حذف یا محدود کردن تولید و استفاده از POP ها منجر به یک معاهده جهانی به رهبری برنامه محیط‌زیست سازمان ملل متحد (UNEP)[2] در کنوانسیون استکهلم شده است که در ماه مه ۲۰۰۴ توسط بیش از ۱۵۰ کشور به تصویب رسیده است. ۲۰ ترکیب POPs در کنوانسیون استکهلم فهرست شده است (شکل ۲-۱). تعدادی دیگر به‌عنوان POP های بالقوه پیشنهاد شده‌اند و شامل پارافین‌های کلردار

[1] Persistent Organic Pollutants (POPs)

[2] UN Environment Programme

با زنجیره کوتاه، نفتالین‌های کلردار، هگزاکلروبوتادین و پنتاکلروفنل می‌شوند. علاوه بر این، هیدروکربن‌های آروماتیک چند حلقه‌ای[1] و ترکیبات برم‌دار به‌عنوان بازدارنده‌های احتراق[2] و همچنین ترکیبات آلی فلزی، مانند تریبوتیل قلع، به دلیل سمیت بالا و توزیع محیطی گسترده، به‌عنوان ترکیبات POP فهرست شده‌اند. لازم به‌ذکر است ایران عضویت در کنوانسیون استکهلم را پذیرفته و در سال ۲۰۰۸ اولین گزارش عملکرد در مورد ترکیبات POPs تحت عنوان " National Implementation Plan for the Stockholm Convention on Persistent Organic Pollutants " را منتشر نموده است (UNEP, 2008).



شکل ۲-۱) انواع ترکیبات POPs بر اساس کنوانسیون استکهلم

[1] Poly Aromatic Hydrocarbons
[2] Brominated Flame Retardants

بیشتر ترکیبات POPs ساخته دست بشر و شامل آفت‌کش‌ها و مواد شیمیایی صنعتی هستند. چند ترکیب POPدیگر محصولات جنبی و غیرعمدی فرآیندهای صنعتی هستند. در میان ترکیبات شناخته‌شده اولیه که به نام "دوجین کثیف" در اوایل شروع کنوانسیون استکهلم شناخته می‌شوند، می‌توان به آلدرین، کلردان، DDT، دیلدرین، اندرین، هپتاکلر، هگزاکلروبنزن، میرکس و توکسافن اشاره کرد که آفت‌کش‌های ارگانوکلرین هستند و در گروه آفت‌کش‌های ارگانوکلره قرار دارند.

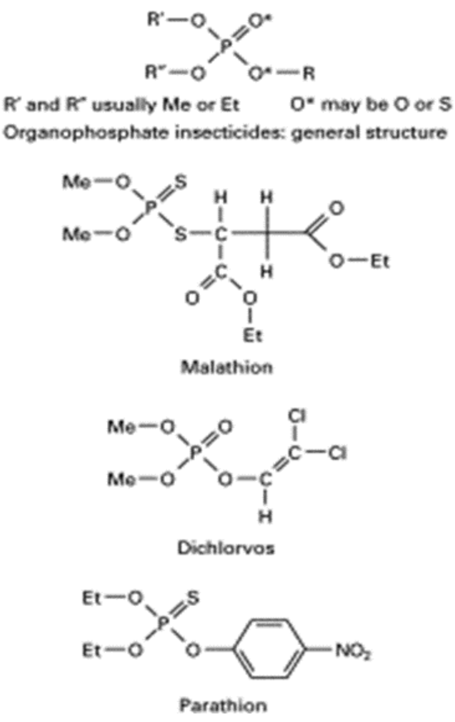
ترکیبات بی‌فنیل‌های پلی‌کلرینه[1]، محصولات شیمیایی صنعتی و ترکیبات بنزو دی‌اُکسین‌های پلی‌کلرینه[2] و ترکیبات دی‌بنزو فوران‌های پلی‌کلرینه[3] محصولات جنبی فرایند احتراق ناقص هستند که در گروه POP ها قرار می‌گیرند. هالوژنه شدن حلقه‌های آلیفاتیک یا آروماتیک به‌صورت (F، Cl یا Br) مشخصه اصلی ترکیبات POP هستند (شکل ۲-۱) که از خصوصیات انحلال‌پذیری کم در آب، حلالیت زیاد در چربی و مقاومت بالا در برابر تخریب شیمیایی، بیولوژیکی و فتولیتیکی برخوردار می‌باشند. ترکیبات POP مستعد جابه‌جایی تا مسافت‌های دور و تجمع زیستی در شبکه غذایی هستند و در تمامی محیط، حتی در مناطق قطبی دور افتاده، از جمله اقیانوس منجمد شمالی نیز وجود دارند. سمیت ترکیبات POP در انسان‌های در معرض مواجهه با این ترکیبات حتی به مقدار کم می‌تواند منجر به پیامدهای سلامتی زیادی از جمله افزایش خطر سرطان، اختلالات تولید مثل، تغییر سیستم ایمنی، اختلال عصبی رفتاری، اختلال غدد درون‌ریز، سمیت ژنتیکی و افزایش نقایص مادرزادی شود. در زمینه ترکیبات POP دو کتاب الکترونیک[4] برای گروه ترکیبات POP با انتشار غیر عمدی[5] (PolyChlorinated DibenzoDioxins و PolyChlorinated DibenzoFurans که در احتراق ناقص تولید می‌شوند) و کتاب ترکیبات POP در قالب حشره‌کش‌های اورگانوکلره توسط نویسنده این کتاب و همکاران منتشر شده است که در پورتال کتابخانه سازمان محیط زیست به آدرس اینترنتی زیر موجود است و می‌تواند در دسترس علاقمندان قرار گیرد:

1. https://dlib.doe.ir/faces/storage/storageWorksheet.jspx?_afPfm=-77v922bev.2.1b.5.1
2. https://dlib.doe.ir/faces/storage/storageWorksheet.jspx?_afPfm=-77v922bev.2.1b.5.2.1

[1] Poly Chlorinated Biphenyl
[2] Poly Chlorinated Dibenzo Dioxins
[3] Poly Chlorinated Dibenzo Furan
[4] E-BOOK
[5] Unintentional-POP

۱-۱-۱۸)   ترکیبات آفت‌کش اورگانوفسفره

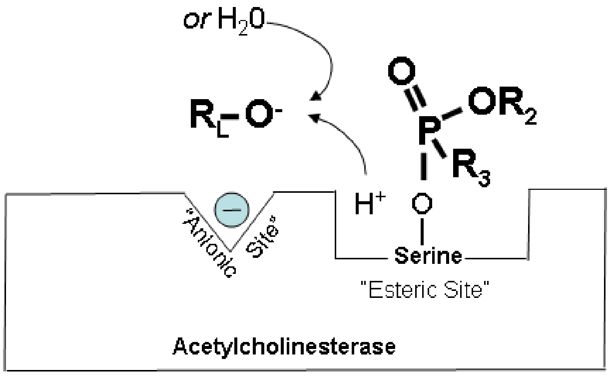
سموم ارگانوفسفره[1] برای اولین بار در طول جنگ جهانی دوم توسط شخصی به نام Schrader ساخته شدند. آنها ابتدا به‌عنوان یک حشره‌کش کشاورزی و بعداً به‌عنوان عوامل بالقوه شیمیایی در جنگ مورد استفاده قرار گرفتند. این ترکیبات معمولاً استرها، استرهای تیول یا مشتقات اسید انیدرید و اسیدهای حاوی فسفر هستند. بیش از ۱۰۰ آفت‌کش ارگانوفسفره در سراسر جهان شامل دی‌متیل فسفریل هستند. ترکیبات ارگانوفسفره استفاده‌شده در جنگ به‌صورت گازهای عصبی مثل Liketabun، Sarin و Soman و بسیار سمی هستند. ترکیبات ارگانوفسفره که غالباً در مزارع به‌صورت آفت‌کش مورد استفاده قرار می‌گیرند شامل Acephate، Parathion، Diazinon، Chlorpyrifos، Dimethoate، Dichlorfenthion، Coumaphos، Malathion و Methyl parathion می‌باشند.



شکل ۳-۱) ساختار شیمیایی برخی از ترکیبات اورگانوفسفره

[1] Organophosphates

مسمومیت حاد توسط ترکیبات ارگانوفسفره در کشاورزان یک مشکل بالینی بزرگ جهانی است و سالانه هزاران مرگ و میر به دلیل مواجهه با آن رخ می‌دهد. در کشورهای در حال توسعه، مشکل بلعیدن عمدی این مواد به‌ویژه در گروه سنی جوان به‌لحاظ دسترسی آسان نیز مطرح می‌باشد. به‌طور کلی مسمومیت ترکیبات ارگانوفسفره بیشتر به‌صورت سرکوب آنزیم کولین استراز و مشکلات عصبی ظاهر می‌شود (شکل ۴-۱).



شکل ۴-۱) تأثیر ترکیبات ارگانوفسفره و سرکوب آنزیم کولین استراز

در سال‌های اخیر بسیاری از مطالعات نشان داده‌اند که ترکیبات ارگانوفسفره با نئوپلاسم‌های هماتولوژیک[1] مرتبط است. برای مثال Weichenthal و همکاران مواجهه شغلی کشاورزان با آفت‌کش‌های chlorpyrifos و phonophosو diazinon را مرتبط با وقوع بیماری‌های لوسمی و سرطان خون اعلام می‌کند.

Schinasi و Leon نیز در مطالعه خود افزایش در لنفوم غیر هوچکین را از طریق مواجهه با ترکیبات Chlorpyrifos, Diazinon, Malathion, Phorate و Terbufos نشان دادند. Hu و همکاران نیز ارتباط مواجهه شغلی Terbufos, Malathion, Diazinon را با بیماری لنفوم غیر هوچکین اعلام نمودند (Hu et al., 2018). علاوه بر این، اخیراً IARC ترکیبات اورگانوفسفره Tetrachlorvinphos و Paration را سرطان‌زا برای انسان و در کلاس B2 و ترکیبات Malathion و Diazinon را در کلاس A2 دسته‌بندی کرده است.

[1] Hematologic Neoplasm

منابع و مراجع اطلاعاتی

Baker, B. A., V. A. Cassano, and C. Murray. 2018. Arsenic Exposure, Assessment, Toxicity, Diagnosis, and Management: Guidance for Occupational and Environmental Physicians. J Occup Environ Med 60 (12): e634-e639. https://doi.org/10.1097/jom.0000000000001485.

Bjørklund, Geir, Bjørn Hilt, Maryam Dadar, Ulf Lindh, and Jan Aaseth. 2019. Neurotoxic effects of mercury exposure in dental personnel. Basic & Clinical Pharmacology & Toxicology 124 (5): 568-574. https://doi.org/https://doi.org/10.1111/bcpt.13199. https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/bcpt.13199.

Budnik, Lygia Therese, Balazs Adam, Maria Albin, B et al. 2018. “Diagnosis, monitoring and prevention of exposure-related non-communicable diseases in the living and working environment: DiMoPEx-project is designed to determine the impacts of environmental exposure on human health.” Journal of occupational medicine and toxicology (London, England) 13: 6-6. https://doi.org/10.1186/s12995-018-0186-9. https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/29441119.https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5800006/.

CAREX-Canada. 2020. https://www.carexcanada.ca/.

Chen, Amy Yuntzu-Yen, and Thomas Olsen. 2016. “Chromated copper arsenate-treated wood: a potential source of arsenic exposure and toxicity in dermatology.” International journal of women’s dermatology 2 (1): 28-30. https://doi.org/10.1016/j.ijwd.2016.01.002. https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/28491998. https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5412102/.

ECHA. 2016. Annex Xv Restriction Report – Lead Stabilisers In Pvc.

EU-OSHA. 2014. Exposure to carcinogens andwork-related cancer: A review of assessment methods.

Gibb, Herman, and Keri Grace O’Leary. 2014. Mercury Exposure and Health Impacts among Individuals in the Artisanal and Small-Scale Gold Mining Community: X References 75 A Comprehensive Review. Environmental Health Perspectives 122 (7): 667-672. https://doi.org/doi:10.1289/ehp.1307864. https://ehp.niehs.nih.gov/doi/abs/10.1289/ehp.1307864.

Hämäläinen P, Takala J, Kiat TB. Global estimates of occupational accidents and work-related illnesses 2017. World. 2017 Sep;2017:3-4.

IARC. 2012. review of human carcinogens–Part C: Arsenic, metals, fibres and dusts.” IARC Monographs: 196-211.

Iavicoli, Sergio, Tim R Driscoll, Martin Hogan, Ivo Iavicoli, Jorma

Harri Rantanen, Kurt Straif, and Jukka Takala. 2019. New avenues for prevention of occupational cancer: a global Occupational and environmental medicine 76 (6): 360-362.

ILO. 2019. The future of work in textiles, clothing, leather and footwear.

IPEN. 2014. An NGO Introduction to Mercury Pollution and the Minamata Convention on Mercury.

NIOSH. 1990. National Occupational Exposure Survey. Available at: http://www.cdc.gov/noes/default.html.

Stenmarck, Åsa, Elin L. Belleza, Anna Fråne, Niels Busch, Åge Larsen, and Margareta Wahlström. Hazardous substances in plastics : ways to increase recycling. 2017: 505 TemaNord. Copenhagen: Nordisk Ministerråd.

Takala, Jukka. 2015. Eliminating occupational cancer in Europe and globally.

UNEP. 2020b. The lead campaign. Leaded petrol phase-out globally. Nairobi, United Nations Environment Programme (https://www.unenvironment.org/explore-topics/transport/what-we-do/partnership-clean-fuels-and-vehicles/lead-campaign).

USGS. 2020. Mineral commodity summaries 2020: U.S. Geological Survey.

WHO. 2014. Chrysotile asbestos. Fact sheet N°343 July.

WHO. 2017. Recycling used lead-acid batteries: health considerations. Geneva, World Health Organization.

WHO. 2019. Exposure to Arsenic: a Major Public Health Concern.

WHO. 2019. Exposure to cadmium: a major public health concern. Geneva, Switzerland.

WHO. 2019c. Exposure to Lead: A Major Public Health Concern.

Attina, T. M., Hauser, R., Sathyanarayana, S., Hunt, P. A., Bourguignon, J.-P., Myers, J. P., Digangi, J., Zoeller, R. T. & Trasande, L. 2016. Exposure to endocrine-disrupting chemicals in the USA: a population-based disease burden and cost analysis. *The lancet Diabetes & endocrinology,* 4**,** 996-1003.

Banu, S. K., Stanley, J. A., Sivakumar, K. K., Arosh, J. A., Taylor, R. J. & Burghardt, R. C. 2017. Chromium VI− Induced developmental toxicity of placenta is mediated through spatiotemporal dysregulation of cell survival and apoptotic proteins. *Reproductive Toxicology,* 68**,** 171-190.

Bernhoft, R. A. 2012. Mercury toxicity and treatment: a review of the literature. *Journal of environmental and public health,* 2012.

CEPN 2019. Clean Electronics Production Network. Qualitative Exposure Assessment: Process Guide. *In:* https://cleanelectronicsproduction.org/downloads/qeaprocessguideaugust2019.pdf.

Dick, F. D. 2006. Solvent neurotoxicity. *Occupational and environmental medicine,* 63**,** 221-226.

DOSH 2018. *Department of Occupational Safety and Health. Ministry of Human Resources Malaysia. A Manual of Recommended Practice: Assessment of the Health Risks Arising from the Use of Hazardous Chemicals to Health at the Workplace*.

Gardner, R. M., Nyland, J. F., Silva, I. A., Ventura, A. M., De Souza, J. M. & Silbergeld, E. K. 2010. Mercury exposure, serum antinuclear/antinucleolar antibodies, and serum cytokine levels in mining populations in Amazonian Brazil: a cross-sectional study. *Environmental research,* 110**,** 345-354.

Gioia, R., Akindele, A. J., Adebusoye, S. A., Asante, K. A., Tanabe, S., Buekens, A. & Sasco, A. J. 2014. Polychlorinated biphenyls (PCBs) in Africa: a review of environmental levels. *Environmental Science and Pollution Research,* 21**,** 6278-6289.

Golbabaie, F., Eskandari, D., Azari, M., Jahangiri, M., Rahimi, A. & Shahtaheri, J. 2012. Health risk assessment of chemical pollutants in a petrochemical complex. *Iran occupational health,* 9.

Hatami, H., Razavi, M., Eftekhar Ardebili, H., F, M., Seyed Nozadi, M. & Parizadeh, M. 2019. *General Public Health*, Arjmand Publisher.

HSE, U. 2003. Good practice and pitfalls in risk assessment. Health and Safety Executive London.

Hu, X. F., Singh, K. & Chan, H. M. 2018. Mercury exposure, blood pressure, and hypertension: A systematic review and dose–response meta-analysis. *Environmental health perspectives,* 126**,** 076002.

HURLEY, R. A. & TABER, K. H. 2015. Occupational exposure to solvents: neuropsychiatric and imaging features. *The Journal of Neuropsychiatry and Clinical Neurosciences,* 27**,** 1-6.

IHME 2020. Institute for Health Metrics and Evaluation. https://vizhub.healthdata.org/gbd-compare/. Accessed May 15th 2020.

IHME 2021. Global Burden of Disease Study 2019 (GBD 2019) Reference Life Table. *Institute for Health Metrics and Evaluation (IHME)*.

ILO 2004. International Labour Organization. Solvents. International Occupational Safety & Health Information Centre.

Lanphear, B. P., Rauch, S., Auinger, P., Allen, R. W. & Hornung, R. W. 2018. Low-level lead exposure and mortality in US adults: a population-based cohort study. *The Lancet Public Health,* 3**,** e177-e184.

Letellier, N., Choron, G., Artaud, F., Descatha, A., Goldberg, M., Zins, M., Elbaz, A. & Berr, C. 2020. Association between occupational solvent exposure and cognitive performance in the French Constances study. *Occupational and environmental medicine,* 77**,** 223-230.

Lynge, E., Anttila, A. & Hemminki, K. 1997. Organic solvents and cancer. *Cancer Causes & Control,* 8**,** 406-419.

Ma, S., Ren, G., Zeng, X., Yu, Z., Sheng, G. & Fu, J. 2018. Polychlorinated biphenyls and their hydroxylated metabolites in the serum of e-waste dismantling workers from eastern China. *Environmental geochemistry and health,* 40**,** 1931-1940.

Malakouti, J., Rezazadeh Azari, M. & Goneh Farahani, A. 2010. Occupational exposure risk assessment of researchers to harmful chemical agents in Shahid Beheshti university of medical sciences. *EBNESINA,* 13**,** 12-16.

Meng, E., Mao, Y., Yao, Q., Han, X., Li, X., Zhang, K. & Jin, W. 2020. Population-based study of environmental/occupational lead exposure and amyotrophic lateral sclerosis: A systematic review and meta-analysis. *Neurological Sciences,* 41**,** 35-40.

OSHA 2006. Fact Sheet. Health Effects of Hexavalent Chromium, np URL: https://www. osha. gov. SLTC/hexavalentchromium/healtheffects. html (accessed: March 09 2016).

Raskin, P. & Kemp-Benedict, E. 2002. Global environmental outlook scenario framework. *Background paper for UNEP's third global environmental outlook report*.

Ratnaike, R. N. 2003. Acute and chronic arsenic toxicity. *Postgraduate medical journal,* 79**,** 391-396.

Rim, K. T. 2017. Reproductive Toxic chemicals at work and efforts to protect workers' health: a literature review. *Safety and health at work,* 8**,** 143-150.

Ruiz, D. Patisaul, H. Endocrine Society."Endocrine-Disrupting Chemicals (EDCs) | Endocrine Society." Endocrine.org, Endocrine Society, 4 March 2024. https://www.endocrine.org/patient-engagement/endocrine-library/edcs

Shin, S. & Byeon, S.-H. 2021. Review and improvement of chemical hazard risk management of Korean Occupational Safety and Health Agency. *International journal of environmental research and public health,* 18**,** 9395.

TAKALA, J., Hämäläinen, P., Saarela, K. L., Yun, O. Y., Manickam, K., Wee Jin, T., Heng, P., Tjong, C., Guan Kheng, L. & Lim, S. 2014. Global estimates of the burden of injury and illness at work in 2012. *Journal of occupational and environmental hygiene* 11**,** 326-337.

Trasande, L., Zoeller, R. T., Hass, U., Kortenkamp, A., Grandjean, P., Myers, J. P., Digangi, J., Hunt, P. M., Rudel, R. & Sathyanarayana, S. 2016. Burden of disease and costs of exposure to endocrine disrupting chemicals in the E uropean U nion: an updated analysis. *Andrology,* 4**,** 565-572.

Uhrlandt, S. 2006. Silica in Kirk-Othmer encyclopedia of chemical technology. *John Wiley & Sons, Inc.: Hoboken, New Jersey,* 22**,** 365-379.

UN 2018. UN Human Rights Council. Workers' Rights and Toxic Exposures - Report of the Special Rapporteur on toxic waste. https://www.ohchr.org/en/documents/thematic-reports/ahrc3948-workers-rights-and-toxic-exposures-report-special-rapporteur.

UNEP 2008. UN Environment Programme. National Implementation Plan for the Stockholm Convention on Persistent Organic Pollutants. Stockholm UNEP.

WHO 2010. Exposure to cadmium: a major public health concern. Geneva, Switzerland. *World Health Organization, www. who. int/ipcs/features/cadmium. pdf (accessed 13 January 2015)*.

WHO 2019. World Health Organization. Preventing disease through healthy environments: exposure to lead: a major public health concern. World Health Organization.

WHO 2023. Supporters and Friends. https://www.iarc.who.int/cards_page/about-iarc/supporters-and-friends-2/.

فصل ۲: شناسایی مخاطرات ترکیبات شیمیایی در مشاغل مختلف و طبقه‌بندی آنان بر اساس کدهای GHS

۲–۱) مقدمه

در فصل شماره ۱ کاربرد و اهمیت ترکیبات شیمیایی در صنایع مختلف مورد بررسی قرار داده شد. در فصل دوم شناسایی ترکیبات شیمیایی و اثرات بالقوه آنها بر سلامت شاغلین مورد بحث قرار داده می‌شود. در این فصل با توجّه به رویکرد عمل‌گرایی کتاب، مواجهه شیمیایی چند گروه شغلی با وظایف مشابه، با ذکر مثال آورده شده است. با توجّه به اطلاعات ارائه شده، انتظار می‌رود که کارشناسان برخوردار از سطح دانش خوب در رشته مهندسی بهداشت حرفه‌ای (کارشناسان ارشد مهندسی بهداشت حرفه‌ای و تجربه کار در حدود ۳ الی ۵ سال) بتوانند با دریافت اطلاعات ارائه شده در متون علمی و تجربه کاری در مورد تماس‌های شغلی کارکنان، در زمینه شناسایی ترکیبات توانمند شوند.

۲–۱–۱) نحوه شناسایی ترکیبات شیمیایی در فرایندهای صنعتی، کشاورزی و خدماتی

همان‌طور که در فصل شماره ۱ ذکر گردید، مراکز شغلی مختلف با توجّه به ماهیت کاری آنها دارای ریسک‌های بالقوه از تماس شغلی با عوامل زیان‌آور شیمیایی، فیزیکی و بیولوژیکی مختلف هستند. در این فصل و سایر فصول کتاب، با توجّه به هدف اصلی نویسندگان در طرح چالش‌های عوامل شیمیایی محیط کار، فقط ترکیبات شیمیایی مورد بحث قرار داده می‌شوند. از کارشناسان محترم تقاضا می‌شود مطالب ارزیابی و ارزشیابی عوامل فیزیکی و بیولوژیکی را از کتب دیگر پیگیری نمایند.

لازم به یادآوری است که مواد شیمیایی در فرآیندهای شغلی به ترکیباتی گفته می‌شود که به‌عنوان مواد اولیه یا مواد بینابینی، مواد تولید شده در طی فرآیند، مواد افزودنی، مواد به‌کار رفته در نگهداری سیستم‌ها، مواد مصرف شده در آزمایشگاه و پسماند، شناخته می‌شوند.

بهترین راه یادگیری فرآیندهای تکنولوژیکی بازدید از مراکز شغلی و پرسش از مسئولین برای دریافت اطلاعات است. همچنین شرح فرآیندهای صنعتی و خدماتی به زبان انگلیسی در سایت‌های علمی نیز ذکر شده‌اند و هم‌اکنون سایت‌های صنعتی کشور نیز مبادرت به ارائه اطلاعات در این زمینه به زبان فارسی نموده‌اند.

به‌طور کلی توصیه می‌شود که مطالب در زمینه تکنولوژی فرایندهای صنعتی از سایت‌های کشور و سایر سایت‌های تخصصی بین‌المللی مورد مطالعه قرار داده شوند. در زمینه ارائه اطلاعات و مخاطرات شغلی بهترین مرجع، سایت سازمان بین‌المللی کار ILO[1] و سازمان AIHA[2] به شرح آدرس‌های زیر می‌باشند:

[1]https://www.iloencyclopaedia.org

[۲]https://www.aiha.org/get-involved/volunteer-groups/volunteer-committees-bodies-of-work/industrial-hygiene-hazard-identification-and-exposure-risk-assessment-by-market-segment

در زمینه‌های مختلف شغلی به‌شرح زیر اطلاعات لازم را فراهم می‌نماید:

رویکرد ارزیابی مواجهه شغلی • **صنایع بر پایه منابع بیولوژیکی**[۱]
کشاورزی و صنایع وابسته به منابع طبیعی[۲] **صنایع نوشابه**[۳] **صنایع مرتبط با ماهیگری**[۴] **صنایع غذایی**[۵] **جنگابانی**[۶] **شکار**[۷] **پرورش دام**[۸] **چوب**[۹] **صنایع کاغذ و خمیر کاغذ**[۱۰]
• **صنایع مبتنی بر منابع طبیعی**[۱۱]

[1] Industries Based on Biological Resources
[2] Agriculture and Natural Resources Based Industries
[3] Beverage Industry
[4] Fishing
[5] Food Industry
[6] Forestry
[7] Hunting
[8] Livestock Rearing
[9] Lumber
[10] Paper and Pulp Industry
[11] Industries Based on Natural Resources

آهن و فولاد[۱] حفاری معدن و استخراج معادن[۲] اکتشاف و توزیع نفت[۳] تولید برق و توزیع آن[۴]
• **صنایع شیمیایی[۵]**
فرآوری شیمیایی[۶] نفت و گاز طبیعی[۷] صنایع داروسازی[۸] صنایع لاستیک[۹]
• **صنایع سازنده وسایل مختلف[۱۰]**
لوازم و تجهیزات برقی[۱۱] فرآوری فلزات و صنایع فلزکاری[۱۲] میکروالکترونیک و نیمه هادی‌ها[۱۳] پوشاک و محصولات نساجی نهایی[۱۴] چرم، خز و کفش[۱۵] صنعت کالاهای نساجی[۱۶]
• **صنایع حمل و نقل[۱۷]**
ساخت تجهیزات هوا و فضا و نگهداری آن[۱۸] وسایل نقلیه و ماشین‌آلات سنگین[۱۹] کشتی و قایق سازی و تعمیرات آن[۲۰]
• **ساخت و ساز[۲۱]**
اقسام ساخت و سازها
• **بخش‌های خدماتی و تجارت[۲۲]**

[1] Iron and Steel
[2] Mining and Quarrying
[3] Oil Exploration and Distribution
[4] Power Generation and Distribution
[5] Chemical Industries
[6] Oil and Natural
[7] Gas Chemical Processing
[8] Pharmaceutical Industry
[9] Rubber Industry
[10] Manufacturing Industries
[11] Electrical Appliances and Equipment
[12] Metal Processing and Metal Working Industry
[13] Microelectronics and Semiconductors
[14] Clothing and Finished Textile Products
[15] Leather, Fur and Footwear
[16] Textile Goods Industry
[17] Transport Industries
[18] Aerospace Manufacture and Maintenance
[19] Motor Vehicles and Heavy Equipment
[20] Ship and Boat Building and Repair
[21] Construction
[22] Services and Trade

شیشه، سفال و اجناس مرتبط[1] صنعت چاپ، عکاسی و تکثیر[2] صنایع ساخت وسایل چوبی[3] صنایع نساجی و پوشاک[4] مراکز آموزشی و خدمات آموزشی[5] اورژانس و خدمات امنیتی[6] مراکز درمانی و خدمات مراقبت‌های بهداشتی[7] هتل‌ها و رستوران‌ها[8] مراکز سرگرمی و نمایشگاه‌های[9] مراکز اداری و اماکن فروش اجناس مختلف[10] خدمات شخصی و اجتماعی[11] خدمات اجتماعی و دولتی[12] صنایع حمل و نقل و انبارداری[13]
• **دستورالعمل راهنما برای ردیابی مواد شیمیایی به کار برده شده در صنایع بر اساس حروف اختصاری و واحدهای آنها**
راهنمای مشاغل[14] راهنمای مواد شیمیایی[15] واحدها و حروف اختصاری[16]

از مراکز اطلاعاتی تخصصی بین‌المللی دیگر که در زمینه ارائه اطلاعات نوع تماس‌های شغلی کارکنان بسیار مفید هستند می‌توان به سایت‌های زیر اشاره کرد:

۱- سازمان بهداشت و ایمنی کشور آمریکا (https://www.osha.gov/a-z)

۲- انستیتوی ملی ایمنی و بهداشت حرفه‌ای (https://www.cdc.gov/niosh/topics/default.html)

۳- مرکز اطلاعات ترکیبات شیمیایی مخاطره‌آمیز و بیماری‌های مرتبط (https://www.haz-map.com)

---

[1] Glass, Pottery and Related Materials
[2] Printing, Photography and Reproduction Industry
[3] Woodworking
[4] Textile and Apparel Industries
[5] Education and Training Services
[6] Emergency and Security Services
[7] Health Care Facilities and Services
[8] Hotels and Restaurants
[9] Entertainment and the Arts
[10] Office and Retail Trades
[11] Personal and Community Services
[12] Public and Government Services
[13] Transport Industry and Warehousing
[14] Guide to Occupations
[15] Guide to Chemicals
[16] Guide to Units and Abbreviations

۴- مرکز اطلاعات کشور کانادا در بهداشت حرفه‌ای و ایمنی (https://www.ccohs.ca/oshanswers/az.html)

۵- سازمان اجرایی بهداشت و ایمنی کشور انگلستان (https://www.hse.gov.uk/a-z/n.htm)

۲-۱-۲) نحوه تشخیص گروه‌های شغلی با وظایف مشابه و اهمیت این گروه‌بندی در ارزشیابی مواجهه شغلی

در شرایطی که شرکت‌های بزرگ دارای صدها کارمند هستند، مطالعه تک‌تک افراد کاری بسیار وقت‌گیر و پرهزینه است و غالباً فراتر از بودجه مراکز بهداشت و ایمنی صنایع است. از این‌رو ارزیابی و یا ارزشیابی مواجهه کارکنان از طریق دسته‌بندی کارکنان در گروه‌های شغلی با وظایف مشابه یا همان گروه‌های شغلی با مواجهه مشابه و بررسی تعدادی محدود از هر گروه شغلی انجام می‌شود.

۲-۱-۲-۱) شناسایی گروه‌های شغلی با مواجهه مشابه

گروه‌های شغلی با مواجهه مشابه در واقع گروه‌های شغلی با وظیفه تقریباً همسان هستند که از این پس در این کتاب با عنوان اختصاری SEG نام‌گذاری می‌شوند. گروه‌های SEG از کارگرانی تشکیل می‌شود که دارای ریسک‌های بهداشتی مشترک و پروفایل‌های مواجهه مشابهی هستند. SEG ها بر اساس آگاهی از فعالیت شغلی کارکنان و با پیش‌فرض وظایف مشابه انتخاب می‌شوند.

SEG نقش مفیدی در زمینه ارزیابی و ارزشیابی مواجهه شغلی در برنامه‌های بهداشت و ایمنی شغلی دارد. بدین ترتیب که داده‌های به دست آمده از فرآیند ارزیابی یا ارزشیابی تعداد محدودی از کارگران یک گروه کاری بزرگ با وظایف مشابه، که در معرض خطرات تقریباً یکسانی هستند، می‌تواند برای پیش‌بینی ریسک‌های بهداشتی کل افراد آن گروه کاری انتخاب شوند و در نتیجه در هزینه‌های بررسی و زمان، صرفه‌جویی قابل توجّهی انجام می‌شود.

در این زمینه تشخیص درست کارکنان در گروه‌های مختلف SEG بسیار مهم و سازنده است. برای سایت‌های کاری متغیر یا دارای تحرک زیاد که در آن‌ها، فعالیت‌ها و مواجهه‌های مرتبط ممکن است تغییر

نماید، دسته‌بندی کارکنان در گروه‌های SEG باید بر اساس فرآیند شغلی، وظیفه و سیستم‌های کنترل‌کننده مهندسی محیط کار انجام شود.

۲-۱-۲-۲) نحوه انتخاب گروه‌های SEG

انتخاب گروه‌های SEG با مشاهده مستقیم محیط کار و با مشارکت کارکنان امکان‌پذیر می‌شود. برای این منظور می‌توان در صورت امکان از داده‌های موجود در ارزشیابی مواجهه‌های شغلی کارکنان استفاده کرد. به‌طور کلی گروه‌بندی کارکنان با مشاهده فعالیت‌های کاری آنان، شرح وظیفه شغلی، فرآیند و نوع تماس‌های شغلی با یک یا چند ترکیب شیمیایی در محیط کار و با در نظر گرفتن سیستم‌های کنترلی به‌شرح زیر انجام می‌گیرد.

- وظایف شغلی هر یک از اعضای گروه SEG به‌لحاظ کیفی مشابه با اعضای دیگر گروه و با تعداد دفعات مشابهی انجام می‌شود.
- گروه کاری SEG از مواد یا فرآیندهای مشابهی برای انجام وظایف شغلی خود استفاده می‌کنند.
- وظایف شغلی گروه SEG با به‌کارگیری دستورالعمل‌های یکسانی انجام می‌شود.
- وظایف شغلی گروه SEG نزدیک به منابع مشابه انتشار ترکیبات شیمیایی انجام می‌شود.

۲-۱-۲-۳) مثال هایی از گروه‌های شغلی SEG

الف) کارکنان سم‌پاش دفع آفات مزارع می‌توانند از نظر کاربرد یک یا چند ماده شیمیایی خاص، با تعداد دفعات مشابه استفاده از سم و جذب آن از راه تنفسی و پوستی، در یک گروه SEG قرار گیرند.

ب) کارگران جوشکار برای ساخت سازه‌های ساختمانی که از یک ابزار خاص جوشکاری استفاده نموده و دارای مدت زمان کاری تقریباً برابر و در کارگاهی با مشخصات محیطی (با یا بدون سیستم‌های کنترل‌کننده آلودگی هوا) یکسان هستند، نیز می‌توانند در یک گروه خاص SEG دسته‌بندی شوند.

۲-۱-۲-۴) کاربرد اطلاعاتی از گروه‌های SEG

اطلاعات به‌دست‌آمده از گروه‌های SEG می‌تواند برای جمع‌آوری و طبقه‌بندی داده‌ها و تجزیه و تحلیل روندهای سلامتی گروه‌های کارکنان در دستجات مختلف استفاده شود. این اطلاعات می‌تواند تأمین‌کننده اطلاعات لازم برای پروفایل مواجهه کارکنان باشد و در صورت لزوم، برای توجیه کارفرمایان در مورد لزوم اقدامات کنترلی به کار برده شود.

۲-۱-۲-۵) ارزش گروه‌های SEG

گروه‌های SEG و داده‌های آن‌ها در گروه‌هایی با تعداد محدودی از کارکنان، امکان پیش‌بینی پیامدهای احتمالی را در جمعیت‌های بزرگ‌تر ممکن می‌سازد. اطلاعات به‌دست‌آمده از گروه‌های کوچک می‌تواند مشخص‌کننده کارآمدی سیستم‌های کنترل‌کننده برای به حداقل رساندن تماس‌های شغلی با ترکیبات شیمیایی باشد. این اطلاعات همچنین می‌تواند برای مقایسه با سایر SEG های مشابه در سایر محل‌های کاری استفاده شود. کاربرد کارکنان در گروه‌های SEG به‌طور صحیح، امکان انجام برنامه ارزیابی یا ارزشیابی شغلی کارکنان را با حداقل هزینه فراهم می‌سازد و با ابزارهای آماری می‌توان داده‌های جمع‌آوری‌شده را به جمعیت‌های بزرگ‌تر کارکنان تسری داد.

هدف یک برنامه نظارتی مهندسی بهداشت حرفه‌ای، شناسایی و پایش شغلی کارکنان، تشخیص مواجهه‌های غیرقابل‌قبول و اصلاح سیستم‌های کنترل کارگاه برای شرایط قابل‌قبول است. در حقیقت، کاربرد تقسیم‌بندی کارکنان در گروه‌های SEG تعادل امکانات موجود در زمینه هزینه‌های ارزیابی یا ارزشیابی و اقدامات کنترلی در محیط کار را برقرار می‌سازد. طبقه‌بندی صحیح کارکنان در گروه‌های SEG برای ارزیابی یا ارزشیابی مواجهه شغلی در فصل‌های بعدی این کتاب آورده شده است که دانستن آن برای متخصصین بهداشت حرفه‌ای بسیار ارزشمند است. مزیت دیگر گروه‌بندیSEG، به‌حساب آوردن وضعیت کلیه کارکنان در زمان گروه‌بندی آن‌ها است که احتمالاً در شرایط دیگر نادیده گرفته می‌شود.

۲-۱-۳) سیستم بین‌المللی هماهنگ‌سازی کد ترکیبات شیمیایی برای معرفی مشخصات ایمنی و اثرات بالقوه بر سلامت کارکنان و محیط زیست

برای تسهیل دستیابی به اطلاعات اثرات بهداشتی ترکیبات شیمیایی بر سلامت شاغلین، سیستم جهانی هماهنگ شده (GHS)[1] از سوی سازمان ملل متحد برای طبقه‌بندی و برچسب‌گذاری مواد شیمیایی معرفی شده است که جایگزین مناسبی برای مجموعه‌ای از روش‌های طبقه‌بندی و برچسب‌گذاری مواد خطرناک است. اطلاعات مربوط به خصوصیات فیزیکی، الزامات محیط زیستی و خصوصیات بهداشتی و ایمنی مواد شیمیایی خطرناک را می‌توان از طریق GHS به دست آورد.

GHS تقریباً تمام مواد شیمیایی خطرناک را پوشش می‌دهد. هیچ دسته یا گروه شیمیایی در طبقه‌بندی GHS نادیده گرفته نشده است. منظور از اصطلاح "ترکیبات شیمیایی" به‌طور گسترده شامل تمام مواد شیمیایی است که به‌صورت محصولات مصرفی، مخلوط‌ها، یا تولید مواد شیمیایی ثانویه (به‌صورت سهوی یا عمدی) در فرایندهای صنعتی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

هدف اساسی این سیستم کدگذاری ترکیبات شیمیایی برای تسهیل دستیابی به اطلاعات قابل‌اعتماد و قابل‌درک در مورد خطرات بالقوه ترکیبات شیمیایی توسط کارفرمایان و کارکنان است تا بر اساس آن بتوانند برای اقدامات پیشگیرانه و حفاظتی مؤثر در راستای سلامت و ایمنی خود اقدام نمایند. GHS خطرات ذاتی موجود در مواد شیمیایی را به‌صورت خالص و مخلوط شناسایی می‌کند و اطلاعات خطرات بالقوه این ترکیبات را با کدهایی که دارای حرف شروع‌کننده H هستند، نشان می‌دهند که بیانیه‌های خطر را در سیستم استاندارد یکپارچه مطرح می‌کند.

[1] Globally Harmonized System (GHS)

۲-۱-۳-۱) جداول GHS و کدها یا عبارات H

GHS توسط سازمان ملل متحد برای هماهنگ نمودن مقررات و استانداردهای مواد شیمیایی در سال‌های اخیر ارائه شده است. دلایل ارائه روش GHS توسط سازمان ملل متحد عبارت است از:

- وجود سیستم‌های مختلف طبقه‌بندی و برچسب‌گذاری محصولات شیمیایی در سطوح بین‌المللی
- سیستم‌های متنوع طبقه‌بندی و برچسب‌گذاری در داخل یک کشور
- تفاوت‌های طبقه‌بندی و برچسب‌گذاری برای یک ترکیب (طبقه‌بندی متفاوت مواد سرطان‌زا و ...)
- گزارش درک بسیار سخت طبقه‌بندی سیستم‌های متفرقه برای کارگران

با توجّه به پذیرش سیستم GHS در بیشتر کشورها، کاربرد سیستم یاد شده به‌شرح زیر می‌باشد:

- ارتقای کارآمدی مقررات
- تسهیل در تجارت
- آسان‌سازی اجرای طبقه‌بندی
- کاهش هزینه‌ها
- ارائه اطلاعات مطلوب و سازگار در مراتب اجرایی
- اطلاعات مناسب جهت بهینه‌سازی حمل و نقل و استفاده ایمن از مواد شیمیایی
- ترویج بهترین واکنش اضطراری به حوادث شیمیایی
- تسهیل در ارزیابی ریسک برای مواجهه شغلی کارکنان

تمام مواد و محصولات شیمیایی به‌شرح زیر تحت پوشش سیستم GHS قرار می‌گیرد:

- مواد شیمیایی صنعتی
- مواد شیمیایی مورد مصرف در جامعه
- آفت کش‌ها
- مواد شیمیایی مصرفی در بخش کشاورزی
- مواد دارویی

۲-۳-۱-۲) طبقه‌بندی مخاطرات فیزیکی، سلامت و محیط زیست ترکیبات با استفاده از بیانیه‌های مخاطرات

ترکیبات شیمیایی بر حسب طبقه‌بندی سیستم جهانی GHS در سه کلاس ۱) دارای اثرات بالقوه بر سلامت، ۲) دارای خطرات فیزیکی و ۳) دارای خطرات محیط زیستی به‌شرح جداول ۲-۱ تا ۲-۳ طبقه‌بندی شده‌اند. در ارزیابی ریسک کیفی سلامت کارکنان در مواجهه با ترکیبات شیمیایی، ترکیبات طبقه‌بندی شده برای سلامت در گروه یا سری ۳۰۰ مورد نظر هستند که با حرف H شروع می‌شوند. لازم به‌ذکر است که کدهای شروع شده با عبارات ۲۰۰ و ۴۰۰ نیز برای موضوعات ایمنی و محیط زیست هستند که می‌بایست در جای مناسب دیگر مطرح شوند. فهرست کدها و مفاهیم آنها در جدول ۲-۱ آورده شده است.

جدول ۱-۲) کدهای GHS برای اثرات بالقوه ترکیبات شیمیایی بر سلامت انسان (کدهای سری ۳۰۰)

(رنگ‌ها بر اساس شدت سمیت ترکیبات انتخاب شده‌اند: رنگ قرمز بیشترین سمیت و رنگ آبی کمترین سمیت)

شماره کد ترکیبات بر اساس GHS گروه ترکیب بر اساس سمیت (گروه ۱ بیشترین و گروه ۵ کمترین)	توصیف کدهای GHS
H300Category 1, 2	کشنده در صورت بلعیده شدن[1]
H301 Category 3	سمی در صورت بلعیده شدن[2]
H302 Category 4	زیان‌آور در صورت بلعیده شدن[3]
H303 Category 5	ممکن است در صورت بلعیده شدن زیان‌آور باشد[4]
H304 Category 1	ممکن است در صورت بلعیده شدن کشنده باشد و وارد مجاری تنفسی شود[5]
H305 Category 2	ممکن است در صورت بلعیده شدن زیان‌آور باشد و وارد مجاری تنفسی شود[6]
H310 Category 1, 2	کشنده در صورت تماس پوستی
H311 Category 3	سمی در صورت تماس پوستی[7]
H312 Category 4	زیان‌آور در صورت تماس پوستی[8]

[1] May be harmful if swallowed
[2] May be fatal if swallowed and enters airways
[3] May be harmful if swallowed and enters airways
[4] Fatal in contact with skin
[5] Toxic in contact with skin
[6] Harmful in contact with skin
[7] May be harmful in contact with skin
[8] Causes severe skin burns and eye damage

H313 Category 5	ممکن است در صورت تماس پوستی زیان‌آور باشد[1]
H314 Category 1	ایجاد کننده سوختگی پوستی و آسیب چشم
H315 Category 2	ایجاد کننده تحریک پوست[2]
H316 Category 3	ایجاد کننده تحریک پوستی خفیف[3]
H317Category 1	ممکن است باعث واکنش پوستی شود[4]
H318Category 1	ایجاد کننده آسیب‌های جدی در چشم
H319Category 2	ایجاد کننده تحریکات جدی در چشم[5]
H320Category 2B	ایجاد تحریک چشم[6]
H330Category 1, 2	کشنده در شرایطی که استنشاق شود[7]
H331Category 3	سمی در صورتیکه استنشاق شود[8]
H332Category 4	زیان‌آور در صورتیکه استنشاق شود[9]
H333Category 5	احتمالاً زیان‌آور در صورتیکه استنشاق شود[10]
H334Category 1	در صورت استنشاق ممکن است علائم آلرژیک و یا آسم و مشکلات تنفسی را ایجاد کند[11]
H335Category 3	ممکن است ایجاد کننده حساسیت تنفسی باشد[12]
H336Category 3	ممکن است باعث خواب آلودگی و سرگیجه شود[13]
H340Category 1	ممکن است باعث نواقص ژنتیکی شود[14]
H341Category 2	مشکوک به ایجاد نواقص ژنتیکی[15]
H350Category 1	ممکن است باعث سرطان شود[16]
H351Category 2	مشکوک به سرطان‌زایی[17]
H360Category 1	ممکن است باعث آسیب به جنین یا سیستم باروری شود[18]

[1] Causes skin irritation
[2] Causes mild skin irritation
[3] May cause an allergic skin reaction
[4] Causes serious eye damage
[5] Causes serious eye irritation
[6] Causes eye irritation
[7] Fatal if inhaled
[8] Toxic if inhaled
[9] Harmful if inhaled
[10] May be harmful if inhaled
[11] May cause allergy or asthma symptoms or breathing difficulties if inhaled
[12] May cause respiratory irritation
[13] May cause drowsiness or dizziness
[14] May cause genetic defects
[15] Suspected of causing genetic defects
[16] May cause cancer
[17] Suspected of causing cancer
[18] May damage fertility or the unborn child

مشکوک به آسیب رساندن به سیستم باروری یا جنین[۱]	H361 Category 2
مشکوک به آسیب رساندن به جنین[۲]	H361d Category 2
مشکوک به آسیب به سیستم باروری[۳]	H361f Category 2
مشکوک به آسیب به سیستم باروری و جنین[۴]	H361 fd Category 2
ممکن است باعث آسیب به نوزادی شود که از شیر مادر تغذیه می‌کند[۵]	H362 Additional category
باعث آسیب به ارگان‌ها می‌شود[۶]	H370 Category 1
ممکن باعث آسیب به ارگان‌ها شود[۷]	H371 Category 2
آسیب به ارگان‌ها از طریق مواجهه طولانی مدت یا مواجهه مکرر[۸]	H372 Category 1
آسیب به ارگان‌ها از طریق مواجهه طولانی مدت یا مواجهه مکرر[۹]	H373 Category 2
کشنده در صورت بلعیده شدن و یا تماس پوستی[۱۰]	H300+H310 Category 1, 2
کشنده در صورت بلعیده شدن و یا استنشاق[۱۱]	H300+H330 Category 1, 2
کشنده در صورت تماس پوستی و یا استنشاقی[۱۲]	H310+H330 Category 1, 2
کشنده در صورتبلعیده شدن، تماس پوستی و یا استنشاقی[۱۳]	H300+H310+H330 Category 1, 2
سمی در صورت بلعیده شدن و یا تماس پوستی[۱۴]	H301+H311 Category 3
سمی در صورت بلعیده شدن و یا استنشاق[۱۵]	H301+H331 Category 3
سمی در صورت بلعیده شدن+ سمی در صورت تماس پوستی+ سمی در صورت استنشاق[۱۶]	H301+H311+ H331 Category 3
سمی در تماس پوستی و یا استنشاق[۱۷]	331+ 311 Category 3

[1] Suspected of damaging fertility or the unborn child
[2] Suspected of damaging the unborn child
[3] Suspected of damaging fertility
[4] Suspected of damaging fertility; Suspected of damaging the unborn child
[5] May cause harm to breast-fed children
[6] Causes damage to organs
[7] May cause damage to organs
[8] Causes damage to organs through prolonged or repeated exposure
[9] May cause damage to organs through prolonged or repeated exposure
[10] Fatal if swallowed or in contact with skin
[11] Fatal if swallowed or if inhaled
[12] Fatal in contact with skin or if inhaled
[13] Fatal if swallowed, in contact with skin or if in-haled
[14] Toxic if swallowed or in contact with skin
[15] Toxic if swallowed or if inhaled
[16] Toxic if swallowed+ Toxic in contact with skin+ Toxic if inhaled
[17] Toxic in contact with skin or if inhaled

H302+H312 Category 4	سمی در صورت بلعیده شدن، تماس پوستی و یا استنشاق[۱]
H302+H332 Category 4	زیان‌آور در صورت بلعیده شدن و یا تماس پوستی[۲]
H312+H332 Category 4	زیان‌آور در صورت بلعیده شدن و یا استنشاق[۳]
H302+H312+H332 Category 4	زیان‌آور در صورت بلعیده شدن، تماس پوستی و یا استنشاق[۴]

جدول ۲-۲) کدهای GHS برای مخاطرات فیزیکی ترکیبات شیمیایی

شماره کد ترکیبات بر اساس GHS	توصیف کدهای GHS
H200	مواد منفجره ناپایدار[۵]
H201	مواد منفجره و انفجار بزرگ[۶]
H202	مواد منفجره مخاطرات شدید[۷]
H203	مواد منفجره؛ خطر آتش سوزی، انفجار و مخاطرات دیگر[۸]
H204	آتش و یا مخاطرات دیگر[۹]
H205	امکان انفجار بزرگ در حریق[۱۰]
H220	گاز فوق‌العاده آتش‌زا[۱۱]
H221	گاز آتش‌زا[۱۲]
H222	آئروسل فوق‌العاده محترقه[۱۳]
H223	آئروسل آتش‌زا[۱۴]
H224	مایعات و بخارات فوق‌العاده آتش‌زا[۱۵]
H225	مایعات و بخارات آتش‌زا[۱۶]

[1] Toxic if swallowed, in contact with skin or if inhaled
[2] Harmful if swallowed or in contact with skin
[3] Harmful in contact with skin or if inhaled
[4] Harmful if swallowed, in contact with skin or if inhaled
[5] Unstable explosive
[6] Explosive; mass explosion hazard
[7] Explosive; severe projection hazard
[8] Explosive; fire, blast or projection hazard
[9] Fire or projection hazard
[10] May mass explode in fire
[11] Extremely flammable gas
[12] Flammable gas
[13] Extremely flammable aerosol
[14] Flammable aerosol
[15] Extremely flammable liquid and vapor
[16] Highly flammable liquid and vapor

مایعات و بخارات محترقه[1]	H226
مایعات قابل احتراق[2]	H227
جامدات قابل احتراق[3]	H228
ظروف تحت فشار که ممکن است در نتیجه حرارت بترکد[4]	H229
ممکن است حتی در نبود هوا واکنش انفجاری نشان دهد[5]	H230
ممکن است حتی در نبود هوا در فشار و یا دمای زیاد واکنش انفجاری نشان دهد[6]	H231
حرارت دهی ممکن است باعث انفجار گردد[7]	H240
حرارت دهی ممکن است باعث حریق یا انفجار گردد[8]	H241
حرارت دهی ممکن است باعث حریق شود[9]	H242
در صورت قرار گرفتن در معرض هوا خود به خود آتش می‌گیرد[10]	H250
گرمایش به خودی خود ؛ ممکن است آتش بگیرد[11]	H251
گرمایش به خودی خود در مقادیر زیاد و ممکن است آتش بگیرد[12]	H252
در تماس با آب، گازهای قابل اشتعال آزاد می‌نماید و ممکن است خود به خود مشتعل شود[13]	H260
در تماس با آب گاز قابل اشتعال آزاد می‌کند[14]	H261
ممکن است باعث ایجاد یا تشدید آتش شود اکسید کننده است[15]	H270 H270
ممکن است باعث آتش سوزی یا انفجار شود اکسید کننده قوی[16]	H271

[1] Flammable liquid and vapor
[2] Combustible liquid
[3] Flammable solid
[4] Pressurized container: may burst if heated
[5] May react explosively even in the absence of air
[6] May react explosively even in the absence of air at elevated pressure and/or temperature
[7] Heating may cause an explosion
[8] Heating may cause a fire or explosion
[9] Heating may cause a fire
[10] Catches fire spontaneously if exposed to air
[11] Self-heating; may catch fire
[12] Self-heating in large quantities; may catch fire
[13] In contact with water releases flammable gases which may ignite spontaneously
[14] In contact with water releases flammable gas
[15] May cause or intensify fire; oxidizer
[16] May cause fire or explosion; strong oxidizer

ممکن است آتش را تشدید کند؛ اکسید کننده[۱]	H272
حاوی گاز تحت فشار؛ در صورت گرم شدن ممکن است منفجر شود[۲]	H280
حاوی گاز یخچالی؛ ممکن است باعث سوختگی یا آسیب برودتی شود[۳]	H281
ممکن است برای فلزات خورنده باشد[۴]	H290

جدول ۳-۲) کدهای GHS برای مخاطرات محیط زیستی ترکیبات شیمیایی

توصیف کدهای GHS	شماره کد ترکیبات بر اساس GHS
بسیار سمی برای آبزیان[۵]	H400
سمی برای آبزیان [۶]	H401
مضر برای آبزیان[۷]	H402
بسیار سمی برای آبزیان با اثرات طولانی‌مدت[۸]	H410
سمی برای آبزیان با اثرات طولانی‌مدت[۹]	H411
مضر برای آبزیان با اثرات طولانی‌مدت[۱۰]	H412
ممکن است اثرات مضر طولانی‌مدت برای آبزیان ایجاد کند[۱۱]	H413
با از بین بردن اُزن در جو فوقانی به سلامت عمومی و محیط زیست آسیب می‌رساند[۱۲]	H420

[1] May intensify fire; oxidizer
[2] Contains gas under pressure; may explode if heated
[3] Contains refrigerated gas; may cause cryogenic burns or injury
[4] May be corrosive to metals
[5] Very toxic to aquatic life
[6] Toxic to aquatic life
[7] Harmful to aquatic life
[8] Very toxic to aquatic life with long-lasting effects
[9] Toxic to aquatic life with long-lasting effects
[10] Harmful to aquatic life with long-lasting effects
[11] May cause long-lasting harmful effects to aquatic life
[12] Harms public health and the environment by destroying ozone in the upper atmosphere

۲–۱–۴) مثال‌هایی از شناسایی ترکیبات شیمیایی در گروه‌های SEG مختلف

۲–۱–۴–۱) مراتب شناسایی ترکیبات شیمیایی مخاطره‌آمیز برای سلامتی کارکنان در گروه‌های شغلی SEG در بخش‌های مختلف صنعتی، کشاورزی و خدماتی

شناسایی ترکیبات شیمیایی مخاطره‌آمیز در گروه‌های شغلی SEG به‌شرح زیر انجام می‌شود:

۱- طبقه‌بندی کارکنان در گروه‌های SEG

۲- شناسایی مواجهه شغلی گروه‌های SEG با ترکیبات شیمیایی با استفاده از سایت‌های تخصصی (در بخش نخست این فصل توضیح داده شده است.)

۳- استخراج کدهای GHS ترکیبات شیمیایی از برگه‌های SDS[1]

۴- بررسی اثرات بالقوه ترکیبات از طریق بررسی کدهای سری ۳۰۰ با حرف شروع کننده H

۲–۱–۴–۲) مثال‌هایی از گروه‌های SEG و مواجهه بالقوه آنان با ترکیبات شیمیایی

مثال ۱) تراشکاری CNC برای ساخت قطعات فلزی نیروی محرکه خودرو





شرح وضعیت شغل گروه SEG کارکنان تراشکار CNC

- نام خط تولید: تراشکاری دقیق قطعات فلزی
- نوع شغل: تکنسین تراشکار
- شرح ایستگاه‌های انجام وظایف کارکنان: دستگاه‌های تراشکاری CNC و تراشکاری توسط روغن‌کاری

[1] Safety Data Sheet

- وظایف شغلی گروه SEG: قرار دادن قطعات فلزی در دستگاه و برنامه‌ریزی سیستم تراشکاری
- تعداد کارکنان: حدود ۲۰۰ نفر
- مدت زمان شیفت کار و تعداد دفعات انجام کار در طول روز: در دو شیفت کاری ۱۲ ساعته و شش روز در هفته
- مخاطرات شغلی کارکنان به‌صورت مواجهه با ترکیبات شیمیایی: مواجهه با میست روغن معدنی[1]
- سیستم‌های موجود به‌صورت کنترل فنی مهندسی و سایر اقدامات کنترلی به‌صورت مدیریتی

نکته قابل توجّه: بر اساس کاتولوگ‌های سیستم‌های تراش CNC می‌بایست مجهز به سیستم مرکزی تهویه صنعتی شوند که متأسفانه هیچ یک از دستگاه‌های شرکت متصل به سیستم مکش هوا نبودند.

اطلاعات سم‌شناسی و کد GHS اجزای متشکله مایعات روان‌کننده تراشکاری فلزی یا همان روغن‌های معدنی در جدول زیر آورده شده است:

جدول ۴-۲) اجزای اصلی تشکیل‌دهنده روغن‌های معدنی و خصوصیات سم‌شناسی آن

نام ترکیب	TLV- TWA از کتابچه ACGIH (۲۰۲۳) یا OEL از کتابچه حدود مجاز مواجهه شغلی مرکز سلامت و محیط کار وزارت بهداشت (۱۴۰۰)	کدGHS یا عبارات خطر[2] برای روغن‌های معدنی
روغن‌های معدنی	روغن تمیز: ۵ mg/m^3 روغن کثیف: نماد L (به معنای کمترین تراکم ممکنه به دلیل دسته‌بندی آن به‌عنوان سرطان‌زای A2)	R: 45
تری‌اتانول آمین	۵ mg/m^3 (حساسیت چشم و پوست)	H314: سوختگی شدید پوست و آسیب به چشم H331: سمی در صورت استنشاق
N-نیتروزودی‌اتانول آمین	ندارد	H301: سمی در صورت بلعیده شدن H311: سمی در صورت تماس پوستی H314: سوختگی شدید پوست و آسیب به چشم H317: احتمال آلرژی پوستی H331: سمی در صورت استنشاق H331: مشکوک به ایجاد نواقص ژنتیکی

[1] Mineral Oil
[2] R phrase

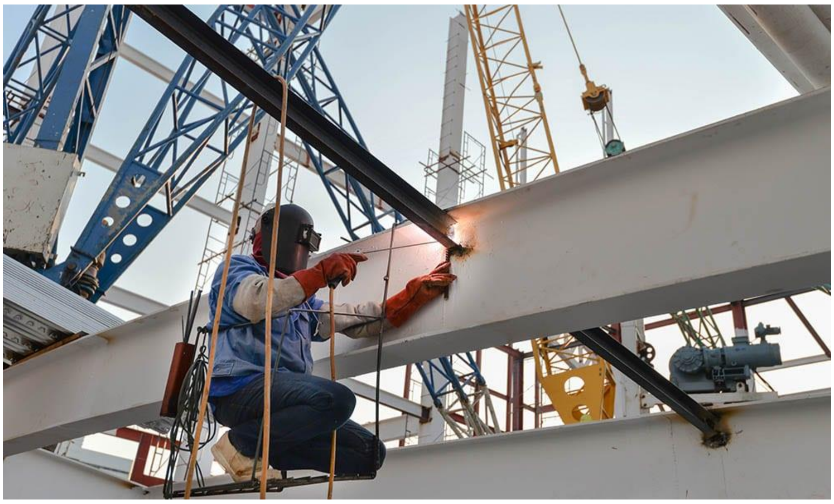
		H350: سرطان‌زای احتمالی
فرمالدئید	TLV_TWA : ۰.۱ ppm TLV_STEL : ۰.۳ ppm	H300: کشنده در صورت بلعیده شدن H319: ایجاد کننده حساسیت شدید چشم
دی‌اُکسین	ندارد	H301: سمی اگر بلعیده شود H311: سمی در شرایط تماس پوستی H314: سوختگی شدید پوست و آسیب به چشم H317: احتمال آلرژی چشمی H331: سمی در صورت استنشاق H341: مشکوک به ایجاد نواقص ژنتیکی H350: سرطان‌زای احتمالی

اطلاعات مربوط به سمیت روغن‌های معدنی و کدهای GHS یا عبارات خطر را می‌توان از سایت‌های اطلاعاتی به‌شرح زیر استخراج گردد:

- بررسی متون علمی (کتاب سم‌شناسی صنعتی نوشته Greenberg)
- کتاب شناسایی ترکیبات مخاطره‌آمیز صنعتی نوشته Burgess
- دائرةالمعارف بهداشت حرفه‌ای سازمان (https://www.iloencyclopaedia.org)
- مرکز کانادایی بهداشت حرفه‌ای و ایمنی

- https://www.ccohs.ca/search/?q=pnos&section=oshanswers
- https://www.chemicalbook.com/ProductMSDSDetailCB4853677_EN.htm
- https://www.haz-map.com
- https://www.ilo.org/dyn/icsc/showcard.home
- https://www.ccohs.ca/oshanswers/
- https://www.ccohs.ca/oshanswers/
- https://www.worksafe.vic.gov.au/
- https://www.osha.gov/publications/bytype/fact-sheets
- https://www.osha.gov/publications/bytype
- https://www.ccohs.ca/oshanswers/
- :https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov pubchem

مثال ۲) جوشکاران سوله و سازه‌های ساختمانی



در این کارخانه قطعات فلزی بسیار بزرگ به سفارش مشتریان از صفحات فلزی آهن برای ساخت سوله‌ها و سازه‌های ساختمانی در کنار هم قرار می‌گیرند و در مرحله نهایی جوشکاری می‌شوند.

شرح وضعیت کارگران گروه SEG کارکنان جوشکار قطعات فلزی[1]

- وسایل حفاظت فردی: لباس کار و کفش ایمنی
- مشاهدات کارشناس از نحوه انجام وظایف کارکنان: هیچ‌گونه استفاده‌ای از وسایل حفاظت فردی توسط کارکنان مشاهده نشد و لباس‌های کار آن‌ها نیز تمیز نبود.
- نوع مواد شیمیایی، مقدار و نحوه کاربرد آن در فرایند شغلی کارکنان: الکترودهای جوشکاری، رنگ و روغن
- آلاینده‌های شیمیایی در طول فرایند صنعتی: فیوم اکسید آهن و گازهای نیتریک اکساید، دی‌اکسید نیتروژن، هیدروژن فلوراید، فُسژن، اُزن، مونوکسیدکربن، دی‌اکسید کربن
- سوابق آلاینده‌سنجی، بیماری‌های شغلی و شکواییه کارکنان در مورد مسائل سلامت: اطلاعاتی در دسترس نبود.

[1] Mild Steel

جدول ۵-۲) اجزای اصلی تشکیل‌دهنده دمه ناشی از جوشکاری فلزی و خصوصیات سم‌شناسی آن

نام ترکیب	TLV- TWA از کتابچه ACGIH (۲۰۲۳) یا OEL از کتابچه حدود مجاز مواجهه شغلی مرکز سلامت و محیط کار وزارت بهداشت (۱۴۰۰)	کد GHS یا عبارات خطر برای روغن‌های معدنی
دمه اکسید آهن Fe_2O_3	۵ mg/m^3 پنوموکونیوزیس	H332
دی‌اکسید نیتروژن	۰.۲ ppm محرک	H331
اُزن	کار سنگین: ۰.۰۵ ppm کار متوسط: ۰.۰۸ ppm کار سبک: ۰.۱۰ ppm برای فعالیت‌های متغیر با میزان مواجهه کمتر از ۲ ساعت و در بارهای کاری سنگین، متوسط و سبک: ۰.۲ ppm	H320: تحریک چشم H370: آسیب به اندام‌های بدن H372: آسیب به اندام‌های بدن در مواجهه طولانی مدت و یا مکرر
هیدروژن فلوراید	TLV_TWA: ۰.۵ ppm TLV_C: ۲ ppm	H300: سمیت شدید در صورت دریافت از راه دهانی H310: سمیت شدید پوستی H330: سمیت شدید در صورت استنشاق H314: خورندگی پوست و یا آسیب به چشم H318: آسیب جدی به سلامت و یا تحریک چشم

منابع اطلاعاتی برای تعیین نوع مواجهه شغلی کارگران در گروه SEG جوشکاری قطعات فلزی:

- **https://www.iloencyclopaedia.org/**
- **https://www.ccohs.ca/search/?q=pnos&section=oshanswers**
- **https://www.chemicalbook.com/ProductMSDSDetailCB4853677_EN.htm**
- **https://www.haz-map.com**
- **https://www.worksafe.vic.gov.au/**
- **https://www.osha.gov/publications/bytype/fact-sheets**
- **https://www.osha.gov/publications/bytype**
- **Google search: Mild Steel Welding and occupational hazards**
- **https://www.hse.gov.uk/research**

جدول ۶-۲) جدول راهنما برای طبقه‌بندی اثرات سلامت بر انسان بر اساس کدهای GHS

نام گروه SEG	نام ترکیب شیمیایی	TLV	کد GHS و تفسیر آن	ملاحظات

منابع و مراجع اطلاعاتی

https://www.iloencyclopaedia.org
IH 101: Introduction to Industrial Hygiene Program Management Part 1 – Similar Exposure Groups (SEGs) - VelocityEHS. Available from: https://www.ehs.com/2021/03/ih-101-introduction-to-industrial-hygiene-program-management-part-1-similar-exposure-groups-segs/
https://www.complianceandrisks.com/topics/globally-harmonized-system/
https://www.osha.gov/a-z
https://www.cdc.gov/niosh/topics/default.html?CDC_AA_refVal=https%3A%2F%2Fwww.cdc.gov%2Fniosh%2Faz%2Fdefault.html
https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/ghs/
https://www.haz-map.com/
https://www.ccohs.ca/oshanswers/az.html
https://www.hse.gov.uk/a-z/n.html

فصل ۳: ارزیابی کیفی مواجهه شغلی با ترکیبات شیمیایی

۳–۱) مقدمه

ارزیابی کیفی مواجهه شغلی (QEA)[۱] به‌طور غیر رسمی از دهه ۵۰ میلادی مطرح بوده است و سازمان AIHA در سال ۱۹۹۱ با انتشار یک کتاب تحت عنوان "راهبرد ارزیابی مواجهه شغلی"[۲]، این روش را به رسمیت شناخت. از آن تاریخ، سازمان AIHA با انتشار چندین کتاب در این زمینه باعث ترویج استفاده از QEA شده است. QEA در مواردی می‌تواند ریسک کارکنان را مشخص نماید و یا توجیه کننده اقدامات گسترده ارزشیابی مواجهه شغلی[۳] باشد که از طریق اقدامات جامع نمونه‌برداری و آنالیز نمونه‌ها انجام می‌شود. ارزیابی کیفی مواجهه شغلی اگرچه نمی‌تواند در تمام موارد جایگزین ارزشیابی مواجهه شغلی گردد، اما در بیشتر مواقع می‌تواند برای تخمین میزان مواجهه شغلی کارکنان به کار رود و به این ترتیب در هزینه‌های نمونه‌برداری و آنالیز صرفه‌جویی کرده و همچنین تسهیل‌کننده رسیدن به هدف نهایی رشته مهندسی بهداشت حرفه‌ای برای سرعت بخشیدن به توجیه اقدامات کنترلی متناسب با شرایط محیط کار باشد. QEA در سه دهه گذشته بر اساس آیین‌نامه‌های مهندسی بهداشت حرفه‌ای در کشورهای غربی به اشکال مختلف انجام شده است و هدف از آن تشخیص سریع مخاطرات شغلی کارکنان از طریق مقایسه سیستم‌های کنترلی موجود با امکانات استاندارد درج شده در برگه‌های SDS است. روش‌های استاندارد کنترلی در قالب اقدامات مهندسی، کنترل مدیریتی و استفاده از وسایل حفاظت فردی مناسب توصیه شده است که متخصصین بهداشت حرفه‌ای به درستی با این موضوع آشنایی دارند. در این فصل، یک روش با نام ارزیابی کیفی مواجهه شغلی (QEA) به‌شرح زیر ارائه می‌شود.

۳–۲) روش ارزیابی کیفی مواجهه

به‌منظور انجام ارزیابی کیفی مواجهه، توجّه به مراتب زیر الزامی است:

---

[1] Qualitative Exposure Assessment

[2] A Strategy for Occupational Exposure Assessment

[3] Risk Evaluation

۳-۲-۱) اهداف ارزیابی کیفی مواجهه شغلی

- بررسی مشکلات کارگران در مواجهه با ترکیبات شیمیایی در فرایندهای شغلی
- بررسی سیستم‌های کنترلی موجود و کیفیت کار آنها
- آشنایی با مشکلات سلامتی و بهداشتی کارکنان
- توجیه لزوم اجرای اقدامات کنترل ریسک برای کارکنان و یا نیاز به انجام بررسی‌های دقیق‌تر
- توجیه مدیریت سازمان‌ها برای برقراری نظم و ترتیب در انجام مراتب شغلی
- تنظیم شیفت‌های کاری کارکنان برای به حداقل رساندن مواجهه با ترکیبات شیمیایی
- آموزش‌های مهارت صحیح انجام وظایف شغلی و آموزش بهداشت برای پیشگیری از مخاطرات

۳-۲-۲) تشکیل کارگروه ارزیابی کیفی مواجهه شغلی

- مدیران ارشد مراکز شغلی یا نماینده تام‌الاختیار آنها که به‌طور قانونی ملزم به پاسخگویی به شکواییه مطرح شده از سوی کارگران در دادگاه‌های کشور هستند، مناسب‌ترین فرد برای مدیریت جلسات ارزیابی کیفی مواجهه شغلی هستند.
- کارشناسان با تجربه در حوزه رشته مهندسی بهداشت حرفه‌ای که در صنعت مشغول به فعالیت هستند و یا ترجیحاً کارشناسان خبره شرکت‌های مهندسی بهداشت حرفه‌ای، در صورت برخورداری از اطلاعات کامل از صنعت و ریسک‌های شغلی آن، می‌بایست به‌عنوان منبع اطلاعاتی و مشاور گروه در جلسات ارزیابی کیفی مواجهه شغلی شرکت نمایند.
- تصمیمات لازم برای ارزیابی کیفی مواجهه شغلی می‌بایست به‌طور گروهی اتخاذ گردد و اقدامات کنترلی می‌بایست صورتجلسه شود و به امضای کلیه اعضای جلسه رسانده شود.

۳-۲-۳) مزیت کاربرد ارزیابی کیفی مواجهه شغلی

- عدم نیاز به انجام اقدامات پرهزینه پایش شغلی کارکنان در اغلب موارد

- شناسایی سریع وضعیت مواجهه شغلی کارکنان و شروع اقدامات کنترلی
- آشنایی مدیران صنعت با مسایل شغلی در هنگام ارزیابی و تأیید تصمیمات کنترلی از طرف آنها

۳-۲-۴) ویژگی‌های تشخیص صلاحیت گروه ارزیابی کیفی مواجهه شغلی

- داشتن پست سازمانی کارشناسی و یا مدیریتی و با تخصص در رشته‌های مهندسی، علوم و مدیریت
- آشنایی با مواد شیمیایی و مخاطرات آنها در صنعت و همچنین تسلط بر برگه‌های SDS مواد شیمیایی
- برخورداری از دانش طراحی سیستم‌های کنترلی و آزمون‌های مربوط به نحوه ارزیابی عملکرد سیستم‌های کنترل مهندسی (تهویه صنعتی)
- برخورداری از دانش سم‌شناسی، اپیدمیولوژی، بیماری‌های شغلی و ارتقای سلامت در محیط کار
- آشنایی با اصول مدیریت و قانون کار

۳-۲-۵) اجرای ارزیابی کیفی مواجهه شغلی در هفت گام

مراحل موجود در روش ارزیابی کیفی مواجهه شغلی در هشت گام ارائه می‌شود (شکل ۱-۳) که در ادامه آورده شده است.



1. سازماندهی گروه مسئول ارزیابی ریسک کیفی
2. تکمیل اطلاعات در مورد ترکیبات شیمیایی
3. ثبت اطلاعات مواجهه کارکنان در گروه‌های SEG
4. بررسی وضعیت امکانات کنترلی شامل کنترل‌های فنی- مهندسی، کنترل‌های مدیریتی و وسایل حفاظت فردی
5. بررسی وضعیت انجام کار بر اساس اطلاعات برگرفته از سایت‌های علمی و برگه‌های SDS
6. بررسی وضعیت ریسک‌های بهداشتی گروه‌های SEG
7. تشخیص وجود ریسک
8. ثبت اطلاعات، انجام اقدامات کنترلی و برنامه‌ریزی برای ارزیابی‌های ریسک بعدی

شکل ۱-۳) سلسله مراتب اجرای فرایند ارزیابی کیفی مواجهه شغلی

۳-۲-۶) گام اول: سازماندهی گروه مسئول ارزیابی کیفی مواجهه شغلی

- تشکیل گروه ارزیابی کیفی مواجهه شغلی متشکل از مدیران بخش‌های مختلف، نماینده کارگران و متخصصین بهداشت حرفه‌ای
- ارائه گزارشی از مخاطرات شیمیایی از طرف کارشناسان رشته مهندسی بهداشت حرفه‌ای و یا یکی از کارشناسان ارشد صنعت
- بازدید اولیه از بخش‌های مختلف صنعت و تدوین برنامه کاری

۳-۲-۶-۱) گام دوم: تکمیل اطلاعات در مورد ترکیبات شیمیایی



• تشکیل جلسات ارزیابی کیفی مواجهه شغلی، بحث و تصمیم‌گیری در خصوص فرایندهای کاری و در صورت نیاز، بهره‌گیری از مشورت متخصصین فنی به‌صورت حضوری یا برخط

• شناسایی مواد شیمیایی مخاطره‌آمیز در صنعت

• شناسایی کلیه ترکیبات اولیه مصرفی، بینابینی و نهایی در فرایند(های) صنعتی

• شناسایی ترکیبات متفرقه به کار برده شده برای حفظ، نگهداری، تمیزکاری و آزمایش ماشین‌آلات

• شناسایی وجود ترکیبات شیمیایی احتمالی در فرایندهای صنعتی از طریق کتب علمی و سایت‌های تخصصی از قبیل:

- https://www.iloencyclopaedia.org
- https://www.ccohs.ca/search/?q=pnos&section=oshanswers
- https://www.chemicalbook.com/productmsdsdetailcb4853677_en.htm
- https://haz-map.com
- https://www.ilo.org/dyn/icsc/showcard.home
- https://www.ccohs.ca/search/?q=pnos&section=oshanswers
- https://www.worksafe.vic.gov.au/
- https://www.osha.gov/publications/bytype/fact-sheets
- https://www.osha.gov/publications/bytype
- https://www.aiha.org/get-involved/volunteer-groups/volunteer-committees-bodies-of-work/industrial-hygiene-hazard-identification-and-exposure-risk-assessment-by-market-seg-ment

- بررسی نشت ترکیبات شیمیایی از کارگاه‌های مجاور به منطقه مورد ارزیابی
- شناسایی مخاطرات شیمیایی و سم‌شناسی از طریق برگه‌های SDS تدوین شده بر اساس استاندارد OSHA (جستجو به‌صورت پیشنهادی: https://www.google.com/search?q=sds+**نام ترکیب**)
- واکاوی اطلاعات سم‌شناسی از سایت‌های مرتبط و معتبر (مانند: (https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov pubchem

۳-۲-۶-۲) گام سوم: ثبت اطلاعات مواجهه کارکنان در گروه‌های SEG

تکمیل فرم شماره-۱ به‌منظور ثبت اطلاعات مواجهه شغلی کارکنان در این مرحله انجام می‌شود. فرم اطلاعاتی شماره-۱ با توجّه به بازدید کارگروه ارزیابی کیفی مواجهه شغلی از بخش‌های مختلف کارگاه تکمیل می‌شود و در این فرایند گروه‌های شغلی مشابه و نوع مواجهه شغلی آنان ثبت می‌گردد. سپس نتایج به‌دست آمده در محیط کارگاهی با موارد اطلاعاتی از سایت‌های مورد تأیید و تخصصی مهندسی بهداشت حرفه‌ای تکمیل می‌شود. از اطلاعات به‌دست آمده از فرم اطلاعاتی مدیریت کنترل سازمانی نیز می‌توان برای اقدامات غیر مهندسی استفاده نمود. همچنین در این مرحله، نظرات کارکنان در مورد برنامه‌های مدیریتی و وسایل حفاظت فردی نیز مشخص و ثبت می‌گردد.

<table dir="rtl">
<tr><td>۱- نوع و محل انجام کار گروه SEG:</td><td>۲-تاریخ بررسی:</td><td rowspan="2"><u>ملاحظات مربوط به گروه‌های SEG</u>
آیا بهداشت فردی کارکنان رعایت می‌شود؟ آری/ خیر
آیا جذب پوستی و گوارشی ترکیبات شیمیایی وجود دارد؟ آری/ خیر
آیا بیماری شغلی در گروه‌های SEG گزارش شده است؟ آری/ خیر
آیا افراد آسیب‌پذیر در گروه‌های SEG وجود دارند؟ آری / خیر</td></tr>
<tr><td>۳- نوع مواجهه با ترکیبات شیمیایی در گروه SEG:</td><td>۴- تعداد کارگران:</td></tr>
<tr><td rowspan="2">۵- آیا مواجهه شغلی غیر منتظره امکان‌پذیر است؟</td><td colspan="2">۷- نوع شیفت کاری:
نرمال چرخشی</td></tr>
<tr><td colspan="2">۸- ساعات کار شیفت:</td></tr>
<tr><td>۶- مدت زمان و تعداد دفعات مواجهه با ترکیبات شیمیایی:</td><td colspan="2">۱۰- امکان تماس شغلی غیر عادی برای کارکنان:</td></tr>
<tr><td rowspan="2">۹- نظر کارگران در مورد سلامت خود و دیگران:</td><td colspan="2">۱۲- کیفیت روش‌های کنترل مدیریتی:
مناسب ☐ غیر مناسب ☐</td></tr>
<tr><td colspan="2">۱۳- کیفیت وسایل حفاظت فردی گروه SEG:</td></tr>
<tr><td rowspan="2">۱۱-کیفیت سیستم تهویه صنعتی بر اساس استاندارد:
مناسب ☐ غیر مناسب ☐</td><td colspan="2">۱۵- امکان مواجهه کارکنان با چند ترکیب به‌طور همزمان:
آری ☐ خیر ☐</td></tr>
<tr><td colspan="2">۱۶- نام ترکیبات و اثرات متقابل:</td></tr>
<tr><td>۱۴- گزارش در مورد سلامت گروه SEG:</td><td></td><td></td></tr>
<tr><td colspan="3">سایر اطلاعات:</td></tr>
</table>

شکل ۲-۳) فرم شماره-۱: مشخصات گروه شغلی SEG با شرایط مواجهه مشابه با مخاطرات شیمیایی

سپس اطلاعات لازم در زمینه سم‌شناسی و طبقه‌بندی ترکیبات از برگه‌های SDS استخراج می‌شود و در فرم شماره-۲ ثبت می‌گردد. در صورتی که برگه‌های SDS همراه ترکیبات ارسال نشده باشد، این برگه‌ها را می‌توان از سایت‌های تخصصی مربوطه دانلود نمود و زیر نظر کارشناسان مجرب برای ارزیابی کیفی مواجهه شغلی مورد استفاده قرار داد.

گروه SEG	**نام ترکیب شیمیایی**	**کد GHS و اثرات سمی مستخرج از برگه SDS**	**اطلاعات سیستم‌های کنترل کننده** (سیستم تهویه صنعتی، مدیریت کنترل وسایل حفاظت فردی)**:**	**ملاحظات** (آدرس اینترنتی سایت‌های تخصصی استفاده شده)

شکل ۳-۳) فرم شماره-۲: درج اطلاعات سم‌شناسی و طبقه‌بندی ترکیبات شیمیایی بر کد GHS

۳-۲-۶-۳) گام چهارم: بررسی وضعیت کنترل‌های فنی– مهندسی، کنترل‌های مدیریتی و کاربرد وسایل حفاظت‌فردی

نحوه اجرای اقدامات کنترلی مدیریتی در یک سازمان می‌بایست به‌طور دقیق از طرف کار گروه ارزیابی کیفی مواجهه شغلی بررسی شود. برای این منظور باید اطلاعات لازم در زمینه نظم و ترتیب کارگاهی، نوبت‌کاری و رضایت کارکنان، انجام وظایف به‌صورت استاندارد، برنامه آموزشی و کیفیت آن و استفاده از وسایل حفاظت فردی بر اساس دستورات سازمان NIOSH به‌طور دقیق و شفاف در فرم شماره-۳ وارد گردد. برای اطلاعات بیشتر در زمینه اقدامات کنترلی- مدیریتی می‌توان از اطلاعات مندرج در سایت دانشگاه آلبرتای کانادا به آدرس زیر استفاده نمود:

https://www.ualberta.ca/human-resources-health-safety-environment/environment-and-safety/hazard-management/how-can-i-control-them/administrative-controls/index.html

گروه شغلی	وضعیت نظم و ترتیب در سطح کارگاه	برنامه شیفت کاری کارکنان و میزان رضایت از آن	کیفیت انجام وظایف در قیاس با روش‌های استاندارد عملیات کار*	برنامه‌های آموزشی کارکنان و میزان رضایت از آن	کیفیت و کاربرد وسایل حفاظت فردی کارکنان**

شکل ۴-۳) فرم شماره-۳: اطلاعات اقدامات مدیریتی سازمان برای کنترل مواجهه شغلی کارکنان

*** روش‌های استاندارد عملیات[1] برای فرایندها (برای مثال فرایند جوشکاری) از طریق جستجو در موتور جستجوگر google به‌شرح زیر قابل واکاوی است:**

https://www.google.com/search?q=sop+welding+operation+pdf+free+download

****وسایل حفاظت فردی استاندارد برای ترکیبات شیمیایی از سایت زیر قابل دریافت است:**

NIOSH pocket guide to chemical hazards department of health and human services centers for disease control and prevention. National Institute for Occupational Safety and Health. September 2007

می‌بایست کیفیت عملکرد سیستم‌های تهویه صنعتی از طریق مقایسه با استانداردهای مندرج در کتاب مرجع تهویه صنعتی، ویرایش بیست و سوم، سال ۲۰۲۳، منتشر شده از سوی سازمان ACGIH[2] بررسی شود. در فصل نهم کتاب تهویه صنعتی، روش اندازه‌گیری ظرفیت کاری هودهای اختصاصی فرایندهای صنعتی ذکر شده است و مهندسین بهداشت حرفه‌ای در زمینه استفاده از آن در بررسی کیفیت سیستم‌های تهویه صنعتی آگاهی کامل دارند. بر اساس این استانداردها، میزان هواگذر مکشی توسط هودهای مختلف از طریق برآورد سرعت جریان هوا به کمک اندازه‌گیری فشار سرعت در کانال تهویه با استفاده از لوله پیتوت یا بادسنج پره‌ای، محاسبه می‌شود و با مشخصات هودهای استاندارد فرایندها مقایسه می‌شود.

---

[1] Standard Operating Procedure

[2] industrial ventilation 23rd edition 1998



شکل ۵-۳) اندازه‌گیری سرعت جریان هوا در سطح باز هود برای محاسبه هواگذر توسط بادسنج پره‌ای

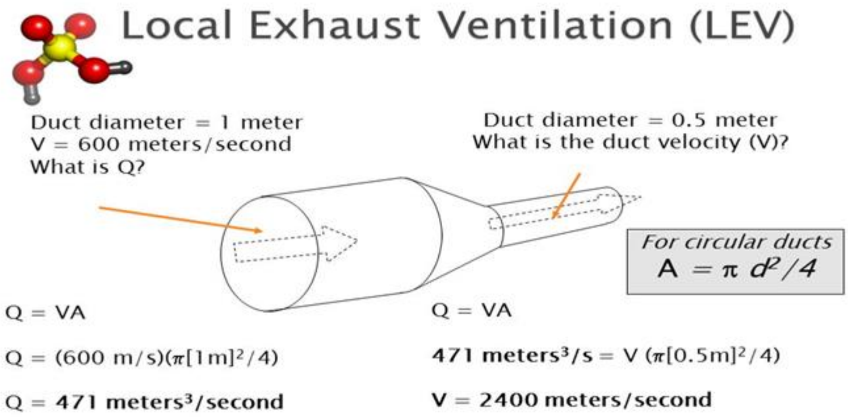


شکل ۶-۳) اندازه‌گیری فشار سرعت در کانال توسط لوله پیتوت



شکل ۷-۳) مجموعه دستگاه‌های اندازه‌گیری سرعت جریان هوا، فشار سرعت و فشار استاتیک

با اندازه‌گیری سرعت جریان هوا و سطح مقطع باز هودهای استاندارد، پارامترهای عملیاتی هودها مانند هواگذر و یا سرعت در دهانه هود را می‌توان محاسبه نمود (شکل ۸-۳) و سپس با استانداردهای ارائه شده برای هودها در کتاب تهویه صنعتی، مقایسه کرد.



شکل ۸-۳) محاسبه هواگذر با استفاده از اندازه‌گیری سرعت در دهانه هود و سطح مقطع دهانه هود

در خاتمه، کلیه محاسبات سیستم تهویه صنعتی در فرم شماره-۴ وارد می‌شود و با استانداردهای ارائه شده برای هود مناسب برای آن فرایند صنعتی از فصل دهم کتاب تهویه صنعتی مقایسه می‌شود. در صورت تطبیق اطلاعات محاسبه شده با پارامترهای عملیاتی هودهای استاندارد، می‌توان نتیجه‌گیری نمود که ترکیبات شیمیایی در فرایندهای صنعتی در حد استاندارد کنترل شده است.

۳-۲-۶-۴) گام پنجم: بررسی وضعیت انجام کار بر اساس اطلاعات برگرفته از سایت‌های علمی و برگه‌های SDS

همان‌طور که در گام سوم گزارش گردید، اطلاعات ترکیبات شیمیایی مندرج در برگه‌های SDS برای مواد اولیه، بینابینی و نهایی از سایت‌های تخصصی جمع‌آوری می‌شود. در اکثر مواقع، در بخش هشتم از برگه‌های SDS، نوع سیستم‌های کنترل‌کننده از جمله سیستم‌های کنترل مهندسی و وسایل حفاظت فردی مناسب آورده شده است. استاندارد سیستم‌های تهویه صنعتی می‌بایست از کتاب تهویه صنعتی سازمان ACGIH استخراج شود که برای حدود دویست فرایند صنعتی، ویژگی‌های هود استاندارد را ارائه کرده است. متخصصان

تهویه صنعتی برای سایر فرایندهای صنعتی که فاقد استاندارد تهویه هستند، می‌بایست از پارامترهای عملیاتی به جهت طراحی یک سیستم تهویه مطلوب استفاده کنند.

مثال: بر اساس استاندارد ارائه شده در کتاب تهویه صنعتی ACGIH برای هودهای تخصصی آزمایشگاهی، ظرفیت‌های عملیاتی زیر توصیه می‌شود:

ظرفیت‌های عملیاتی توصیه شده برای هودهای آزمایشگاهی بر اساس استاندارد:ACGIH

$Q=۸۰-۱۰۰\ cfm/ft^2$ $h_e=0.5\ VP$ $V = 4005 \times \sqrt{VP}$

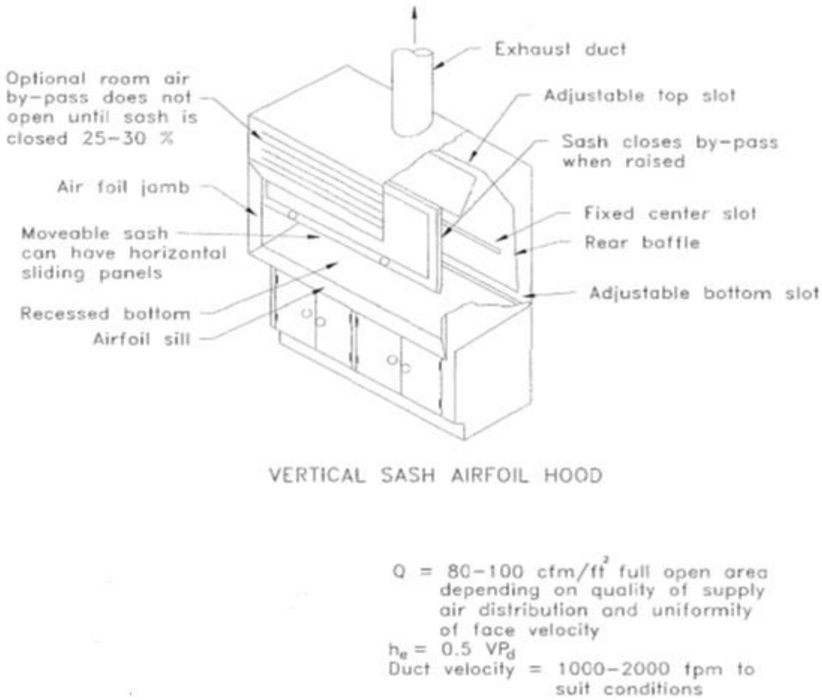
که در آن:

h_e= افت فشار هود

VP= فشار سرعت

V= سرعت جریان (f/m)

با توجّه به اندازه‌گیری‌ها و مقایسه با پارامترهای سیستم تهویه استاندارد آزمایشگاه‌ها، فرم شماره-۴ برای تعیین عملکرد سیستم تکمیل می‌شود و در صورت تطبیق مقادیر اندازه‌گیری شده با پارامترهای اعلام شده، کنترل مواجهه پرسنل در حد استاندارد نتیجه‌گیری می‌گردد.



شکل ۹-۳) هود استاندارد کارهای رایج آزمایشگاهی

شماره / نام فرایند	تعداد نفرات	نام ترکیب شیمیایی	کیفیت سیستم‌های کنترل مدیریت ریسک و وسایل حفاظت فردی	کیفیت سیستم فنی- مهندسی کنترل کارگاه	تشخیص ریسک

شکل ۱۰-۳) فرم شماره-۴: تشخیص ریسک در فرایند ارزیابی کیفی مواجهه شغلی

۳-۲-۶-۵) گام ششم: بررسی وضعیت ریسک‌های بهداشتی گروه‌های SEG



در گام ششم، وضعیت موجود در قیاس با شرایط استاندارد مورد سنجش قرار داده می‌شود و با توجّه به شرایط سیستم‌های کنترل مهندسی و مدیریت ریسک و کیفیت کاربرد وسایل حفاظت فردی و کاربرد آن توسط کارکنان، وضعیت ریسک گروه‌های SEG با تصمیم گروهی اعلام می‌گردد.

۳-۲-۶-۶) گام هفتم: تشخیص کیفی وضعیت ارزیابی مواجهه

نتایج ارزیابی ریسک کیفی مواجهه شغلی توسط کارگروه در چهار رتبه زیر اعلام می‌گردد:

۱- ریسک کارگران با توجّه به اثرات بالقوه ترکیبات شیمیایی و سیستم‌های کنترل کننده قابل‌ملاحظه نیست.

تفسیر: "این به این معنی است که مواجهه با ترکیبات شیمیایی اثرات سلامتی بسیار خفیفی دارد و با توجّه به سیستم‌های کنترل‌کننده موجود، کارگران در معرض مواجهه قابل‌ملاحظه‌ای قرار ندارند".

۲- ریسک کارکنان قابل‌ملاحظه است ولی در حال حاضر به‌صورت مناسب کنترل شده است.

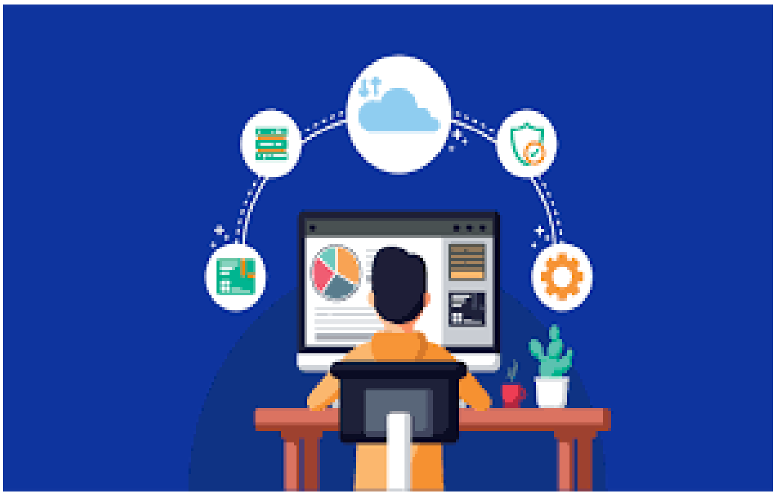
تفسیر: "مواجهه کارکنان با ترکیبات شیمیایی دارای اثرات بالقوه بر سلامت آن‌ها است، اما در حال حاضر با توجّه به سیستم‌های کنترلی موجود، ریسک سلامت برای آنان وجود ندارد".

۳- ریسک کارکنان قابل‌ملاحظه است و با توجّه به شرایط صنعت، مواجهه شاغلین کنترل نشده است.

تفسیر: "کارکنان در معرض ریسک ناشی از ترکیبات شیمیایی مخاطره‌آمیز قرار دارند و سیستم‌های کنترلی موجود به‌طور مؤثر مواجهه آنها را کاهش نمی‌دهند".

تفسیر: "ریسک کارکنان به‌خاطر نامشخص بودن اثرات بالقوه ترکیبات شیمیایی و وضعیت سیستم‌های کنترلی موجود، در هیچ‌یک از درجات ریسک قبلی قرار نمی‌گیرد. بنابراین، انجام مطالعات بیشتر در زمینه شرایط سلامت کارکنان تحت نظر یک کارشناس خبره ضروری است".

۳-۲-۶-۷) گام هشتم: ثبت اطلاعات، انجام اقدامات کنترلی و برنامه‌ریزی برای ارزیابی‌های ریسک بعدی



اقدامات لازم برای فرایند ارزیابی کیفی مواجهه شغلی به تفکیک مرتبه ریسک کیفی به‌شرح زیر توصیه می‌شود:

➢ **اقدامات توصیه شده پس از تشخیص مرتبه ۱ از ریسک کیفی:**

- حفظ و نگهداری سیستم‌های کنترلی
- انجام فرایند ارزیابی ریسک کیفی در صورت تغییر در وضعیت تولید و یا تکرار آن به‌صورت دوره‌ای
- برنامه‌ریزی برای آموزش بدو استخدام و آموزش حین خدمت کارکنان

➢ **اقدامات توصیه شده پس از تشخیص مرتبه ۲ از ریسک کیفی:**

- تعیین دستورالعمل‌های مناسب برای حفظ و نگهداری سیستم‌های کنترلی

- تعیین خط‌مشی کارگاه برای به حداقل رساندن مواجهه‌های شغلی.
- انجام ارزیابی کیفی مواجهه شغلی در صورت تغییر وضعیت کار، تغییر میزان مواجهه شاغلین یا به‌صورت دوره‌ای.
- توصیه به کارفرما برای پایش محیط کار از طریق روش‌های استاندارد نمونه‌برداری و آنالیز و مقایسه با استانداردهای حد تماس شغلی.
- اجرای برنامه آموزشی پیش از استخدام و حین خدمت برای کارکنان.

➢ **اقدامات توصیه شده پس از تشخیص مرتبه ۳ از ریسک کیفی:**

- الزام فوری برای شناسایی و استفاده از روش‌های کنترلی سریع به‌منظور پیشگیری از مواجهه شغلی کارکنان.
- انجام ارزیابی کیفی مواجهه شغلی مجدد بعد از اجرای اقدامات کنترلی تا حصول اطمینان از کاهش مرتبه ریسک به سطح ۱ یا ۲.
- در صورت عدم موفقیت راهکارهای کنترلی برای کاهش ریسک کیفی کارکنان به مرتبه ریسک ۱ و ۲، انجام فرآیند کامل‌تر ارزیابی ریسک (ارزیابی ریسک کیفی، به فصل چهارم مراجعه شود) برای توجیه بیشتر اقدامات کنترلی لازم است.
- در صورت عدم کاهش سطح ریسک کیفی به حد قابل‌قبول پس از انجام اقدامات کنترلی بیشتر، پایش مواجهه شغلی کارکنان به‌صورت دوره‌ای و مبتنی بر روش‌های استاندارد نمونه‌برداری و آنالیز ضروری است.
- آموزش حین خدمت برای کارکنان الزامی است.

➢ **اقدامات توصیه شده پس از تشخیص مرتبه ۴ از ریسک کیفی:**

- انجام بررسی‌های جدید و مشاوره با متخصصین برای تشخیص مخاطرات بالقوه ترکیبات شیمیایی و سیستم‌های کنترل‌کننده تا رسیدن به مرتبه ریسک کیفی ۱ یا ۲.
- تا زمان اتمام بررسی‌ها، اقدامات کنترلی لازم برای به حداقل رساندن مواجهه شغلی باید اجرا شود. آموزش حین خدمت برای کارکنان الزامی است.

۳-۳) مثال‌های عینی از ارزیابی کیفی مواجهه شغلی کارکنان با ترکیبات شیمیایی

۳-۳-۱) مثال شماره-۱: کارخانه ساخت قطعات موتور شرکت BMW در کشور آلمان

فیلم تولید یک کارخانه ریخته‌گری موتورهای BMW استخراج شد. با مشاهده فیلم، استفاده صحیح از سیستم‌های کنترل‌کننده فنی و مهندسی در قالب تهویه صنعتی، شارژ رباتیک کوره ذوب با شمش‌های تمیز از آلیاژ آلومینیوم و آهن و همچنین نظم و ترتیب کارگاهی مشاهده گردید. توصیه می‌شود برای اطلاعات بیشتر از وضعیت کارخانهBMW، کلیپ فیلم بخش ذوب فلز در آدرس اینترنتی زیر مشاهده شود:

https://www.3m.com/blog/en_US/safety-now/science-of-safety/hazardawareness/understand-ing-more-about-the-hazards-of-smelting-and-casting







با توجّه به عکس‌های موجود از کارخانه، شاید تنها اشکال از نظر بهداشتی، عدم تجهیز کارکنان به ماسک تنفسی هنگام بازرسی قطعات مشاهده شده باشد، اما نظم و ترتیب در کلیپ مشهود است. بر اساس مشاهدات، فرم شماره ۱ به شرح زیر تکمیل گردید:

<table>
<tr><th colspan="3">مشخصات گروه شغلی SEG با شرایط مواجهه مشابه با مخاطرات شیمیایی</th></tr>
<tr>
<td>۱- نوع و محل انجام کار گروه SEG:
کارکنان کوره ذوب آلیاژ کارخانه تولید موتور BMW</td>
<td>۲- تاریخ بررسی:
بررسی اخیر از طریق یک برنامه فیلم‌برداری شده از قسمت ریخته‌گری کارخانه BMW به آدرس اینترنتی:
htpps://youtube/5oUDzkkdkpQ</td>
<td rowspan="2">ملاحظات گروه SEG ریخته‌گری
آیا بهداشت فردی کارکنان رعایت می‌شود؟ **آری**
آیا جذب پوستی و گوارشی ترکیبات شیمیایی وجود دارد؟ **خیر**
آیا بیماری شغلی در گروه‌های SEG گزارش شده است؟ **در کلیپ فیلم ذکر نشده است و احتمالاً تنش حرارتی می‌تواند مطرح باشد.**
آیا افراد آسیب‌پذیر در گروه‌های SEG گزارش شده‌اند؟ **در کلیپ فیلم ذکر نشده است**</td>
</tr>
<tr>
<td>۴- نوع مواجهه با ترکیبات شیمیایی در گروه SEG: **در بیشتر کارگاه‌ها شارژ کوره به‌صورت اتوماتیک انجام می‌شود و مواد فلزی در قالب شمش‌های تمیز و به‌صورت اتوماتیک به کوره وارد می‌شوند.**

۵-آیا تماس شغلی غیر منتظره امکان‌پذیر است؟ **خیر**</td>
<td>۳- تعداد کارگران: **حداکثر ده نفر**</td>
</tr>
<tr>
<td>۹- نظر کارگران در مورد سلامت خود و دیگران:
به نظر می‌رسد کارکنان از کار و کیفیت زندگی خوب برخوردار هستند.</td>
<td colspan="2">۱۰- امکان تماس شغلی غیر عادی برای کارکنان:
تماس غیر منتظره بعید به نظر می‌رسد.</td>
</tr>
<tr>
<td>۱۱- کیفیت سیستم تهویه صنعتی بر اساس استاندارد: **مناسب**
با توجّه به کیفیت محیط کارگاه و سیستم‌های تهویه صنعتی موجود</td>
<td colspan="2">۱۲- کیفیت کنترل مدیریتی: **مناسب**
۱۳- کیفیت وسایل حفاظت فردی گروه SEG:
وسایل حفاظت فردی تنفسی توسط کارکنان استفاده نمی‌شود.</td>
</tr>
<tr>
<td>۱۴-گزارش در مورد سلامت گروه SEG:
گزارش مستندی در دسترس نیست.</td>
<td colspan="2">۱۵- امکان مواجهه کارکنان با چند ترکیب به‌طور همزمان: **آری**
۱۶- نام ترکیبات و اثرات متقابل:
دمه فلزات آهن، آلومینیوم و به مقدار جزئی سرب و روی</td>
</tr>
<tr><td colspan="3">سایر اطلاعات: -</td></tr>
</table>

در مرتبه بعدی از فرآیند ارزیابی کیفی مواجهه شغلی، فرم شماره ۲ با توجّه به اطلاعات ثبت‌شده برای صنایع ریخته‌گری ساخت موتور که از سایت‌های تخصصی بهداشت حرفه‌ای استخراج شده، تکمیل گردید. در

این راستا، از یک سایت تخصصی مخاطرات بهداشتی مرتبط با ترکیبات شیمیایی کارکنان ریخته‌گری به آدرس زیر استفاده شد:

https://www.3m.com/blog/en_US/safety-now/science-of-safety/hazardawareness/understanding-more-about-the-hazards-of-smelting-and-casting

در اطلاعات ثبت‌شده در سایت‌های تخصصی بهداشت حرفه‌ای، ترکیبات اصلی در هوای محیط کار ریخته‌گری‌ها شامل سیلیس کریستالی، دمه آهن، دمه آلومینیوم، ترکیباتPAH، فنل، فرمالدئید، منواکسید کربن و هیدروژن فلوراید می‌باشد. برگه SDS ترکیبات فرآیند چدن برای ساخت موتور خودرو در فرآیندهای ریخته‌گری از طریق جستجو در گوگل به دست آمده است. در بخش مخاطرات برگه SDS، موارد زیر اعلام شده است: فرایند طبیعی ذوب فلزات فرآورده‌های چدنی به تنهایی مخاطرات استنشاقی، گوارشی یا پوستی ایجاد نمی‌کند. با این حال، دود و دمه حاصل از آلاینده‌های شارژ فلزات مطرح می‌باشند.

با توجّه به اطلاعات به‌دست‌آمده از دو سایت فوق، فرم شماره ۲ در مورد اطلاعات سم‌شناسی و کدهای GHSو اطلاعات سیستم‌های کنترل‌کننده به‌صورت زیر تکمیل گردید:

فرم شماره-۲: جهت درج اطلاعات سم‌شناسی و طبقه‌بندی ترکیبات شیمیایی بر اساس سیستم جهانی GHS				
گروه SEG	**نام ترکیب شیمیایی**	**کد GHS و اثرات سمی مستخرج از برگه SDS**	**اطلاعات سیستم‌های کنترل کننده** (سیستم تهویه صنعتی، مدیریت کنترل وسایل حفاظت فردی)**:**	**ملاحظات**
کارکنان ریخته‌گری	نام ترکیبات شیمیایی در فرایند به‌صورت یک مجموعه Cast Iron در فرایند ذوب فلزات شامل ترکیبات Crystalline Iron ،Silica Aluminum Fumes و ترکیبات PAH، CO، phenol و formaldehyde	H315: تحریک پوست H320: تحریک چشم H334: در صورت استنشاق ممکن است باعث بروز آلرژی و آسم شود H317: ممکن است باعث آلرژی پوست گردد H341: مشکوک به ایجاد اختلالات ژنتیکی H370: باعث آسیب به اندام‌های کلیه و سیستم تنفسی	برگه SDS بر لزوم استفاده از سیستم تهویه، آموزش فنی و وسایل حفاظت فردی تأکید دارد. در کتاب تهویه صنعتی هود استاندارد برای فرایند ریخته‌گری با مشخصات: Melting Furnace - Electric, Top Electrode Vs-55-03 ارائه شده است. وسایل حفاظت فردی تنفسی بر اساس استانداردهای سازمان NIOSH یا OSHA به‌شرح زیر است: وسایل حفاظت فردی صورت و چشم برای ذرات ریز پرتاب شده در فرایند ریخته‌گری، کفش‌های مناسب و لباس‌های محافظ از جمله آستین بلند و شلوار بلند برای محافظت در طول فرآوری مواد مذاب توصیه می‌شود. هنگام کار با مواد جامد باید از دستکش‌های مناسب استفاده کرد.	ترکیبات شیمیایی موجود در فرایند ذوب فلز به‌صورت یکجا به‌عنوان ترکیباتCast Iron در نظر گرفته شد و SDS این مجموعه از ترکیبات برای فرایند ارزیابی تماس شغلی به‌صورت کیفی مورد استفاده قرار گرفت.

در مرتبه بعدی ارزیابی تماس شغلی به‌صورت کیفی، اقدامات کنترل کننده موجود در صنعت ریخته‌گری مورد بررسی قرار گرفت و فرم شماره-۳ تکمیل گردید.

فرم شماره-۳: اطلاعات اقدامات مدیریتی سازمان برای کنترل مواجهه شغلی کارکنان					
گروه شغلی	وضعیت نظم و ترتیب در سطح کارگاه	برنامه شیفت کاری کارکنان و میزان رضایت از آن	کیفیت انجام وظایف در قیاس با روش‌های استاندارد عملیات کار	برنامه‌های آموزشی کارکنان و میزان رضایت از آن	کیفیت و کاربرد وسایل حفاظت فردی کارکنان
ریخته گری قطعات چدنی کارخانه ساخت موتور BMW	با توجّه به کلیپ مشاهده‌شده از کارخانه BMW، مشکلی در نظم و ترتیب مراتب کاری ساخت موتور چدنی خودرو مشاهده نشد.	بر اساس اطلاعات به‌دست‌آمده از شرایط کاری در کشور آلمان، تعداد ساعات کاری معادل ۵ روز و ۸ ساعت کار به ازای هر روز و زمانی در حدود ۹۰ دقیقه برای استراحت در وقت ناهار برای کارکنان منظور شد. بر اساس مطالعات اداره آمار کشور آلمان، رضایت شغلی کارکنان در ۸۹٪ از موارد مثبت گزارش شده است و حتی سطح رضایت ۳۳٪ از کارکنان در حد عالی بوده است.	بیشتر مراتب کاری کارکنان به‌صورت اتوماتیک است و کارکنان نقش نظارت بر فرآیندها و کنترل کیفی محصولات را دارند.	اطلاعات دقیقی در دست نیست.	در برخی موارد، عدم استفاده از وسایل حفاظت فردی تنفسی در کارگاه ریخته‌گری مشاهده شد.

کیفیت انجام وظایف در قیاس با روش‌های استاندارد را می‌توان از طریق جستجوی اینترنتی google (SOP+نام عملیات صنعتی+pdf free download) واکاوی نمود.

در مرتبه بعدی ارزیابی کیفی مواجهه شغلی، با توجّه به فرم‌های اطلاعاتی تکمیل‌شده بر اساس مشاهده فرآیند صنعتی (فرم‌های ۱ و ۲ و ۳) و همچنین وجود سیستم‌های کنترلی ذکر شده در برگه SDS، ارزیابی ریسک کارکنان ریخته‌گر مطابق فرم شماره ۴ انجام می‌شود.

فرم شماره-۴: تشخیص ریسک مواجهه شیمیایی در فرایند ارزیابی کیفی مواجهه شغلی					
شماره / نام فرایند	تعداد نفرات	نام ترکیب شیمیایی	کیفیت سیستم‌های کنترل مدیریت ریسک و وسایل حفاظت فردی	کیفیت سیستم فنی-مهندسی کنترل کارگاه	تشخیص ریسک
کارکنان ریخته‌گری کارخانه BMW	۱۰	ترکیبات اصلی دمه فلزات، PAH، SiO_2، فنل، CO، فرمالدئید	شیوه کنترل مدیریتی کارخانه مشخص است، ولی در برخی موارد، عدم استفاده از وسایل حفاظت فردی توسط کارکنان مشاهده شد.	کیفیت سیستم‌های تهویه صنعتی مناسب گزارش شده است.	با توجّه به مشاهدات، به نظر می‌رسد کارکنان با ریسک‌هایی روبه‌رو هستند، اما تقریباً کلیه ریسک‌ها به‌طور مناسب کنترل شده است.

همان‌طور که در فرم شماره ۴ دیده می‌شود، مرتبه ریسک فرآیند ارزیابی کیفی مواجهه شغلی معادل ۲ به‌دست آمد. بنابراین می‌توان گفت که "ریسک کارکنان قابل‌ملاحظه است، ولی در حال حاضر به‌طور مناسب کنترل شده است."

پیشنهادات به‌شرح زیر برای کارکنان ریخته‌گری ارائه می‌شود:

- تعیین روش‌های کاری مناسب برای حفظ و نگهداری سیستم‌های کنترلی.
- تعیین خط‌مشی کارگاه برای حداقل رساندن مواجهه‌های شغلی.
- لزوم انجام ارزیابی کیفی مواجهه شغلی به‌صورت دوره‌ای و یا در صورت تغییر در وضعیت کار و افزایش مواجهه شاغلین.
- توصیه به کارفرما برای پایش دوره‌ای سلامت کارکنان.
- اجرای برنامه آموزشی پیش از استخدام و حین خدمت برای کارکنان.

۲-۳-۳) مثال شماره-۲: کارخانه ریخته‌گری ساخت قطعات چدنی در کشور هندوستان

برای آشنایی با فرایندهای ریخته‌گری، توجّه کارشناسان به کلیپ دوم در آدرس اینترنتی زیر جلب می‌شود:

htpps://youtube/enikctjgdzk

بر اساس اطلاعات به‌دست‌آمده از مشاهده فیلم، افراد متعددی در کارگاه ریخته‌گری با حداقل امکانات مشغول به کار هستند. اولین مطلبی که از مشاهده شیوه کاری کارکنان دریافت می‌شود، مهارت آن‌ها در انجام امور شغلی خود است، اگرچه مسائل شغلی متعددی در مورد شیوه کاری آن‌ها مطرح است. برای ارزیابی ریسک کیفی کارکنان این کارگاه صنعتی، همانند فرآیند توصیه‌شده، فرم‌های اطلاعاتی ۱ تا ۳ با اطلاعات به‌دست‌آمده از مشاهده کلیپ فیلم تکمیل می‌شود.



مشخصات گروه شغلی SEG با شرایط مواجهه مشابه با مخاطرات شیمیایی		
۱- نوع و محل انجام کار گروه SEG: **کارکنان کوره ذوب آلیاژ آهن در کشور هندوستان**	۲- تاریخ بررسی: **بررسی اخیر از طریق یک برنامه فیلم‌برداری شده از قسمت ریخته‌گری کارخانه هندی به آدرس اینترنتی:** htpps://youtube/ENikCtjGdzk	ملاحظات گروه SEG ریخته‌گری آیا بهداشت فردی کارکنان رعایت می‌شود؟ **خیر** آیا جذب پوستی و گوارشی ترکیبات شیمیایی وجود دارد؟ **بله** آیا بیماری شغلی در گروه‌های SEG گزارش شده است؟ **در کلیپ فیلم ذکر نشده است و احتمالاً تنش حرارتی می‌تواند مطرح باشد.** آیا افراد آسیب‌پذیر در گروه‌های SEG گزارش شده‌اند؟ **در کلیپ فیلم ذکر نشده است**
۴- نوع مواجهه با ترکیبات شیمیایی در گروه SEG: **شارژ کوره غالباً به‌صورت اتوماتیک انجام می‌شود و مواد فلزی به‌صورت شمش‌های تمیز به کوره وارد می‌شوند.** ۵-آیا تماس شغلی غیر منتظره امکان‌پذیر است؟ **خیر**	۳- تعداد کارگران: **پنجاه نفر**	
۹- نظر کارگران در مورد سلامت خود و دیگران: **با توجّه به شرایط کارگاه ریخته‌گری ارائه‌شده در فیلم، کارگران از هیچ‌گونه امکانات کنترلی برخوردار نیستند. برای مثال، کارگران کفش مناسب ندارند و با پای برهنه در کنار کوره‌های ذوب فلز به کار اشتغال دارند. از این رو، احتمالاً کارگران از وضعیت کار خود راضی نیستند.**	۱۰- امکان تماس شغلی غیر عادی برای کارکنان: **امکان انفجار کوره با توجّه به امکانات مشاهده شده وجود دارد.**	
۱۱- کیفیت سیستم تهویه صنعتی بر اساس استاندارد: **غیرمناسب** **با توجّه به کیفیت محیط کارگاه و سیستم‌های تهویه صنعتی موجود**	۱۲- کیفیت کنترل مدیریتی: **غیر مناسب** ۱۳- کیفیت وسایل حفاظت فردی گروه SEG: **وسایل حفاظت فردی تنفسی توسط کارکنان استفاده نمی‌شود.**	
۱۴-گزارش در مورد سلامت گروه SEG: **گزارش مستندی در دسترس نیست**	۱۵- امکان مواجهه کارکنان با چند ترکیب به‌طور همزمان: **آری** ۱۶- نام ترکیبات و اثرات متقابل: **دمه فلزات آهن، آلومینیوم و به مقدار جزئی سرب و روی**	
سایر اطلاعات: -		

فرم شماره-۲: جهت درج اطلاعات سم‌شناسی و طبقه‌بندی ترکیبات شیمیایی بر اساس سیستم جهانی GHS				
گروه SEG	**نام ترکیب شیمیایی**	**کد GHS و اثرات سمی مستخرج از برگه SDS**	**اطلاعات سیستم‌های کنترل کننده** (سیستم تهویه صنعتی، مدیریت کنترل وسایل حفاظت فردی)**:**	**ملاحظات**
کارکنان ریخته‌گری	نام ترکیبات شیمیایی در فرایند به‌صورت یک مجموعه Cast Iron در فرایند ذوب فلزات شامل ترکیبات Crystalline Silica، Iron Aluminum Fumes و ترکیبات PAH، CO، phenol و formaldehyde	H315: تحریک پوست H320: تحریک چشم H334: در صورت استنشاق ممکن است باعث بروز آلرژی و آسم شود H317: ممکن است باعث آلرژی پوست گردد H341: مشکوک به ایجاد اختلالات ژنتیکی H370: باعث آسیب به اندام‌های کلیه و سیستم تنفسی	برگه SDS بر لزوم استفاده از سیستم تهویه، آموزش فنی و وسایل حفاظت فردی تأکید دارد. در کتاب تهویه صنعتی، هود استاندارد برای فرآیند ریخته‌گری با مشخصات: MELTING FURNACE - ELECTRIC, TOP ELECTRODE VS-55-03 ارائه شده است. وسایل حفاظت فردی تنفسی بر اساس استانداردهای سازمان NIOSH یا OSHA به‌شرح زیر است: وسایل حفاظت فردی صورت و چشم برای ذرات ریز پرتاب‌شده در فرآیند ریخته‌گری، کفش‌های مناسب و لباس‌های محافظ از جمله آستین بلند و شلوار بلند برای محافظت در طول فرآوری مواد مذاب توصیه می‌شود. هنگام کار با مواد جامد باید از دستکش‌های مناسب استفاده کرد.	ترکیبات شیمیایی موجود در فرایند ذوب فلز به‌صورت یکجا به‌عنوان ترکیباتCast Iron در نظر گرفته شد و SDS این مجموعه از ترکیبات برای فرایند ارزیابی تماس شغلی به‌صورت کیفی مورد استفاده قرار گرفت.

فرم شماره-۳: اطلاعات اقدامات مدیریتی سازمان برای کنترل مواجهه شغلی کارکنان					
گروه شغلی	وضعیت نظم و ترتیب در سطح کارگاه	برنامه شیفت کاری کارکنان و میزان رضایت از آن	کیفیت انجام وظایف در قیاس با روش‌های استاندارد عملیات کار	برنامه‌های آموزشی کارکنان و میزان رضایت از آن	کیفیت و کاربرد وسایل حفاظت فردی کارکنان
ریخته گری قطعات چدنی کارخانه هندی	با توجّه به کلیپ مشاهده‌شده از کارخانه هندی، مشکلات فراوانی در نظم و ترتیب مراتب کاری ساخت قطعات چدنی وجود داشت.	بر اساس مطالعات انجام‌شده در هندوستان، به نظر می‌رسد علی‌رغم نداشتن امکانات لازم، کارکنان از وضعیت شغلی خود راضی هستند.	تمام کارهای صنعتی به‌صورت دستی انجام می‌شود، ولی به نظر می‌رسد کارگران در انجام کار خود بسیار کارآزموده هستند.	اطلاعات دقیقی در دست نمی‌باشد.	استفاده از وسایل حفاظت فردی مشاهده نشد.

در مرتبه بعدی ارزیابی کیفی مواجهه شغلی، با توجّه به فرم‌های اطلاعاتی تکمیل‌شده بر اساس مشاهده فرآیند صنعتی (فرم‌های ۱ و ۲ و ۳) و همچنین وجود سیستم‌های کنترلی ذکر شده در برگه SDS، ارزیابی ریسک کارکنان ریخته‌گر در فرم شماره ۴ انجام می‌شود.

فرم شماره-۴: تشخیص ریسک مواجهه شیمیایی در فرایند ارزیابی کیفی مواجهه شغلی					
شماره / نام فرایند	تعداد نفرات	نام ترکیب شیمیایی	کیفیت سیستم‌های کنترل مدیریت ریسک و وسایل حفاظت فردی	کیفیت سیستم فنی-مهندسی کنترل کارگاه	تشخیص ریسک
کارکنان ریخته‌گری قطعات چدنی کارخانه هندی	حداقل ۵۰	ترکیبات اصلی دمه فلزات، PAH، SiO_2، فنل، CO، فرمالدئید	هیچ‌گونه سیستم کنترلی دیده نشد.	-	با توجّه به مشاهدات، به نظر می‌رسد کارکنان درگیر با ریسک سلامت هستند و سیستم‌های کنترلی نیز مناسب نمی‌باشند.

همان‌طور که در فرم شماره ۴ دیده می‌شود، مرتبه ریسک از فرآیند ارزیابی کیفی مواجهه شغلی معادل ۳ به‌دست آمد. بنابراین می‌توان گفت که:

"ریسک کارکنان قابل‌ملاحظه است و با توجّه به شرایط صنعت، مواجهه شاغلین کنترل نشده است". پیشنهادات لازم جهت مدیریت ریسک کارگاه ریخته‌گری هندوستان به‌شرح زیر اعلام می‌شود:

- بررسی توقف فعالیت کارگاه تا حصول اطمینان از سلامت کارکنان (این گزینه برای کشور فقیر هندوستان که از کار خود برای گذران امور زندگی خود راضی هستند، نمی‌تواند مطرح باشد).
- الزام فوری برای شناسایی و به‌کارگیری سریع روش‌های کنترلی و پیشگیری از مواجهه شغلی کارکنان.
- انجام ارزیابی کیفی مواجهه شغلی مجدد بعد از اجرای اقدامات کنترلی تا رسیدن به مرتبه ریسک کیفی ۱ و ۲.
- در صورت عدم توفیق برای کاهش ارزیابی کیفی مواجهه شغلی کارکنان به درجات ریسک ۱ و ۲، ارزیابی ریسک کیفی (به فصل چهارم مراجعه شود) الزامی است.
- در صورت عدم کاهش سطح ریسک به درجه ۱ و ۲ بعد از اجرای اقدامات کنترلی، ارزیابی مجدد ریسک کیفی و یا پایش شغلی کارکنان با استفاده از روش‌های استاندارد نمونه‌برداری و آنالیز الزامی است.
- آموزش حین خدمت برای کارکنان الزامی است.

منابع و مراجع اطلاعاتی

Bullock WH, Ignacio J, Ignacio JS. A strategy for assessing and managing occupational exposures. AIHA; 2006.

National Occupational Health and Safety Commission. guidance notes for the assessment of health risks arising from the use of hazardous substances in the workplace [nohsc:3017(1994)]. March 1994. Available from: https://www.safeworkaustralia.gov.au/system/files/documents/1702/guidancenote_assessment_healthrisksarisingfromhazardoussubstances_workplace_nohsc3017-1994_pdf.

Oil encyclopedia of occupational health and safety files. Available from: https://www.iloencyclopaedia.org/

https://www.ualberta.ca/human-resources-health-safety-environment/environment-and-safety/hazard-management/how-can-i-control-them/administrative-controls/index.html

Barsan, M.E., 2007. NIOSH pocket guide to chemical hazards. Centers for Disease Control (États-Unis). National Institute for Occupational Safety and Health.

https://hrylabour.gov.in/staticdocs/labourpolicies/standard%20operating%20procedures%20(sops)%20for%20safe%20operations%20on%20hazardous%20and%20dangerous%20manufacturing%20processes.pdf

American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH). Industrial Ventilation a Manual of Recommended Practice. 23th Edition 1998. Chapter 9: testing.

فصل ۴: ارزیابی ریسک کیفی مواجهه شغلی با ترکیبات شیمیایی

۴–۱) مقدمه

ارزیابی ریسک کیفی (QRA)[1] در سه دهه گذشته بر اساس تأکید AIHA و پس از انتشار چندین کتاب در این زمینه، به‌طور گسترده‌ای در سراسر کشورهای صنعتی به‌عنوان یک روش مطلوب ارزیابی ریسک مواجهه شغلی مورد استفاده قرار گرفته است. کشورهای مختلف در طول سالیان گذشته، مکتوبات متعددی را برای ارزیابی ریسک منتشر نموده‌اند. در کشور ایران نیز یک نسخه از ترجمه روش ارزیابی ریسک کشور سنگاپور در سال ۱۳۸۵ در کتاب جامع بهداشت عمومی منتشر گردید و مجدداً نسخه به‌روز شده آن در سال ۱۳۹۸ در جلد چهارم کتاب بهداشت عمومی آورده شد (Hatami et al., 2019) و روش یاد شده توسط محققین مختلف مورد استفاده قرار گرفته است .(Golbabaie et al., 2012, Malakouti et al., 2010) به‌طور کلی هدف از ارزیابی ریسک، تشخیص سریع مخاطرات شغلی کارکنان و تسهیل در شناسایی مخاطرات و توجیه در نهایت تصمیم‌گیری در خصوص اجرای اقدامات کنترلی است.

در فصل ۳ این کتاب، ارزیابی کیفی مواجهه به‌عنوان نسخه ابتدایی از QRA ارائه گردید که می‌تواند توجیه‌کننده بررسی‌های بیشتر در قالب ارزیابی ریسک کیفی پیشرفته کارکنان با ترکیبات شیمیایی باشد که تحت عنوان ارزیابی ریسک کیفی در این فصل از کتاب مطرح می‌گردد. در روشQRA ، رتبه‌های ریسک در پنج حیطه ناچیز، کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد مطرح می‌شود که در صورت لزوم می‌تواند توجیه‌کننده انجام ارزشیابی مواجهه شغلی (استفاده از روش‌های مصوب نمونه‌برداری، آنالیز و مقایسه داده‌ها با مقادیر استاندارد تماس شغلی) شود.

لازم به ذکر است که پذیرش روش‌های ارزیابی ریسک کیفی در سال‌های اخیر با انتقادهایی همراه بوده است که در برخی موارد، نویسنده این کتاب هم با طرح این اشکالات و کمبودها موافق است .(HSE, 2003) دانستن این موضوع مهم است که انجام ارزیابی مواجهه کیفی و ارزیابی ریسک کیفی می‌تواند برای کلیه

[1] Qualitative Risk Assessment

کارکنان انجام شود، ولی نمی‌تواند در تمامی شرایط شغلی تعیین‌کننده مطلوبی برای ریسک‌های پیش‌روی کارکنان باشد که در این صورت روش ارزشیابی مواجهه شغلی نیز می‌بایست به کار گرفته شود.

بر اساس نظر متخصصین فن و نویسنده این کتاب، در مواردی از روش ارزیابی کیفی مواجهه یا روش ارزیابی ریسک کیفی می‌توان به‌عنوان ابزاری برای غربالگری ترکیبات شیمیایی جهت برنامه‌ریزی برای پایش شغلی کارکنان درگیر با ترکیبات مخاطره‌آمیز شیمیایی استفاده کرد. روش ارزیابی ریسک کیفی می‌تواند به‌عنوان یک روش کم‌هزینه و سریع برای تعیین وضعیت ریسک شغلی کارکنان به کار برده شود و دستیابی به هدف نهایی رشته بهداشت حرفه‌ای را در کنترل عوامل زیان‌آور محیط کار و پیشگیری از بیماری‌های شغلی تسهیل نماید.

علی‌رغم مقرون به صرفه بودن روش ارزیابی ریسک کیفی، می‌بایست در نظر داشت که استفاده از این روش مستلزم تصمیم‌گیری با مشارکت کارشناسان و مدیران صنعت است که متاسفانه دستیابی به این امر آسان نمی‌باشد. لازم به ذکر است که استفاده از روش ارزیابی ریسک کیفی در کشور انگلستان، آمریکا، کانادا، کره، سنگاپور و استرالیا برای تمامی کارهای صنعتی و آزمایشگاهی مرتبط با مواد شیمیایی الزامی است و در برخی از موارد اقدامات کنترلی سریعاً بعد از ارزیابی ریسک کیفی به مرحله اجرا گذاشته می‌شود و نیاز به انجام ارزشیابی مواجهه شغلی بهداشتی را منتفی می‌سازد.

۴–۱–۱) نحوه انتخاب تکنیک ارزیابی ریسک کیفی از میان روش‌های موجود

همان‌طور که در مقدمه گفته شد، در دو دهه گذشته، چندین روش ارزیابی ریسک کیفی توسط سازمان‌های اجرایی کشورهای مختلف ارائه شده است. روش‌های ارائه شده بر اساس دو پارامتر الف) میزان اثرات بالقوه بر سلامت[۱] و ب) میزان مواجهه[۲] است که بر اساس دو پارامتر یاد شده و یک جدول رتبه‌بندی، درجه ریسک را تعیین می‌گردد. علی‌رغم کاربرد گسترده روش‌های ارزیابی ریسک، به نظر نویسنده این کتاب، کاستی‌هایی در این روش‌های ارائه شده برای تخمین ریسک اثرات بالقوه بر سلامت وجود دارد. از این‌رو، در این فصل ضمن

[1] Health Effect Rate

[2] Exposure Rate

تقدیر از پیشینیان، یک روش خاص به‌صورت محض ارائه نمی‌شود و به‌جای آن با توجّه به مراتب فوق و رعایت حقوق سازمان‌های تدوین‌کننده ارزیابی ریسک کیفی، روش اصلی متداول از کشور آمریکا انتخاب شده است (CEPN, 2019) و بر اساس دو نکته مهم در برآورد ضریب مواجهه اصلاح گردیده است. دو نکته‌ای که در این روش دیده نشده است به‌شرح زیر است:

۱- نقش کمّی مواد مصرفی پودری و تراکم گرد و غبار در هوای محیط کار

۲- امکان جذب پوستی ترکیبات محیط کار توسط کارکنان به‌لحاظ عدم کاربرد روش صحیح انجام وظایف

در روش ارائه شده در این کتاب، نکته اول از محدودیت روش آمریکایی با بهره‌گیری از اطلاعات به‌دست آمده از مقاله منتشر شده توسط Shin و همکاران (Shin and Byeon, 2021) و نکته دوم با استفاده از مطلب منتشر شده توسط اداره ایمنی و بهداشت کار وزارت نیروی انسانی مالزی (DOSH, 2018) اصلاح گردید. همچنین در تشخیص مخاطرات ترکیبات شیمیایی از کدهای ارائه شده در طبقه‌بندی سازمان GHS (HSE, 2003) در فرایند ارزیابی ریسک کیفی استفاده گردید.

۴–۱–۲) مقایسه دو روش QEA و QRA

روش ارزیابی کیفی مواجهه شغلی (QEA) که در فصل سوم آورده شد، برای برآورد سریع ریسک به‌صورت مثبت و منفی مورد استفاده قرار می‌گیرد، امّا روش ارزیابی ریسک کیفی (QRA) با بررسی شواهد و مدارک بیشتری در زمینه میزان مواجهه و خطرات احتمالی، از روش QEA کامل‌تر است و میزان ریسک را به‌صورت رتبه‌ای و از بازه ناچیز تا خیلی زیاد برآورد می‌نماید. هر دو روش QEA و QRA برای تخمین مخاطرات شغلی به کار می‌روند و در شرایط خاص تأکید بر انجام اقدامات کامل‌تری در قالب ارزشیابی مواجهه شغلی می‌کنند.

لازم به‌ذکر است که دستیابی به کامل‌ترین روش تشخیص ریسک بهداشتی با استفاده از روش ارزشیابی مواجهه شغلی کارکنان به‌طور صحیح و با روش‌های استاندارد نمونه‌برداری و آنالیز ارائه شده از سوی سازمان‌های NIOSH و OSHA و مقایسه داده‌های به‌دست آمده با حدود استاندارد مواجهه شغلی محقق

می‌شود. اگرچه علی‌رغم دقت بالای ارزشیابی مواجهه شغلی، این روش‌ها معمولاً بسیار وقت‌گیر و پرهزینه هستند.

۴-۱-۳) شرایط استفاده از روش QRA

کاربرد روش QRA مستلزم فراهم بودن شرایط زیر می‌باشد:

- کاربرد نتایج ارزیابی ریسک کیفی برای محیط‌های کاری دارای خطر مرگ یا آسیب‌های جدی به‌منظور تصمیم‌گیری برای اجرای سیستم‌های کنترلی مناسب نمی‌باشد و فقط می‌تواند به‌عنوان روشی برای دستیابی به اطلاعات اولیه و غربالگری ترکیبات شیمیایی با هدف اولویت‌بندی ارزشیابی مواجهه شغلی آنها با استفاده از روش‌های استاندارد نمونه‌برداری و آنالیز و مقایسه داده‌ها با استاندارد حدود مواجهه شغلی، به کار برده شود.
- مراتب انجام ارزیابی ریسک کیفی می‌بایست طبق دستور کار و با استفاده از نظرات متخصصین در صنایع و توسط متخصص کارآزموده رشته مهندسی بهداشت حرفه‌ای به‌طور گروهی انجام شود.
- در صورتی که ارزیابی ریسک کیفی کارکنان در بدترین و یا بهترین شرایط محیط کار انجام شود، نتایج نمی‌تواند به تمام کارکنان گروه‌های SEG تعمیم داده شود. از این‌رو برای رسیدن به نتیجه مطلوب، تکرار ارزیابی ریسک کیفی در شرایط مختلف توصیه می‌شود.
- برخی از کارشناسان روش‌های ارزیابی ریسک کیفی را به‌عنوان روش‌هایی ساده مطرح می‌نمایند. این در حالی است که با توجّه به پیچیدگی تشخیص ترکیبات مخاطره‌آمیز و مواجهه کارکنان و اهمیت نتایج ارزیابی‌های ریسک، تصور سادگی روش درست نمی‌باشد و می‌بایست نهایت دقت را در انجام ارزیابی ریسک کیفی به کار برد.
- به‌طور کلی ارزیابی ریسک کیفی در شرایط عادی یک روش سریع برای تعیین وضعیت مخاطرات محیط کار است که در مواردی می‌تواند توجیه‌کننده اقدامات کنترلی باشد و یا در نهایت به‌عنوان روشی جهت غربالگری عوامل شیمیایی محیط کار و اولویت‌بندی آنها برای ارزشیابی مواجهه شغلی در نظر گرفته شود.
- آموزش کارشناسان برای انجام فرایند ارزیابی ریسک کیفی بسیار مهم است که گنجاندن مفاد زیر در محتوای آموزشی آنها قویاً توصیه می‌گردد:

۱. کاربرد صحیح اطلاعات مندرج در برگه‌های SDS، برچسب‌ها و طبقه‌بندی مخاطرات بالقوه ترکیبات شیمیایی بر اساس آئین‌نامه‌های وزارت بهداشت و کدهای GHS را به‌خوبی درک نماید.

۲. آشنایی کامل با فرایندهای کاری کارکنان و توانایی پیش‌بینی خطرات احتمالی برای سلامت شاغلین را داشته باشد.

۳. توانایی ایجاد ارتباط مؤثر با کارکنان، مدیران و متخصصان بخش‌های مختلف صنعتی یا خدماتی را برای دسترسی به اطلاعات مورد نیاز جهت شناسایی خطرات بالقوه سلامتی داشته باشد.

۴. بتواند اطلاعات مناسب را از مراجع علمی داخلی و خارجی استخراج کرده و آن‌ها را برای برآورد مواجهه‌های شغلی و خطرات بالقوه به‌خوبی تفسیر نماید.

۵. قابلیت انتقال یافته‌های ارزیابی ریسک به ذینفعان و مقامات بهداشتی کشور را دارا باشد و بتواند از نتایج ارزیابی ریسک کیفی در جمع کارشناسان دفاع نماید.

۶. به‌منظور انجام دقیق مراتب ارزیابی ریسک کیفی، در کارگاه‌های آموزشی برگزار شده توسط اساتید روش ارزیابی ریسک کیفی شرکت کرده باشد.

۴-۱-۴) مراحل ارزیابی ریسک کیفی

از سال ۱۹۹۰ تا ۲۰۲۱، روش‌های مدونی در زمینه ارزیابی ریسک کیفی توسط مراجع مختلف ارائه شده است. در این روش‌ها، عدد ریسک بر اساس دو پارامتر ضریب خطر (اثرات بالقوه بر سلامت) و ضریب مواجهه محاسبه شده و بر اساس عدد ریسک و جدول راهنما، رتبه ریسک در درجات مختلف (ناچیز، کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد) برآورد می‌شود و در نهایت با توجّه به رتبه ریسک به‌دست آمده، پیشنهادات لازم جهت مدیریت ریسک ارائه می‌شود.

روش QRA که در این فصل از کتاب ارائه می‌شود، علی‌رغم نکات اصلاحی نسبت به روش‌های اخیر، پیچیده نیست، ولی مراحل گفته‌شده در آن می‌بایست به‌طور دقیق رعایت گردد. برای این منظور، متخصصین حاضر در کارگروه ارزیابی ریسک کیفی باید به‌درستی آموزش دیده باشند.

در انجام روش ارزیابی کیفی ریسک، ضریب خطر (HR)[1] و ضریب مواجهه (ER)[2]، می‌بایست به‌طور صحیح از طریق کار گروهی متشکل از مدیران و متخصصان صنعتی و با همراهی یک متخصص بهداشت حرفه‌ای

[1] Hazard Rate

[2] Exposure Rate

باتجربه و دوره دیده در این زمینه، برآورد گردد. در صورت امکان و یا در شرایط خاص، ضریب مواجهه را می‌توان از طریق اندازه‌گیری غلظت ترکیبات شیمیایی با استفاده از روش‌های استاندارد نمونه‌برداری و آنالیز، یا دستگاه‌های قرائت مستقیم، به‌دست آورد. هر یک از فرآیندهای خط تولید درگیر با ریسک‌های بالقوه شغلی می‌بایست شناسایی شوند و برای این منظور، باید از گام‌های زیر تبعیت گردد.

۴-۱-۴-۱) گام اول: سازماندهی گروه مسئول ارزیابی کیفی مواجهه شغلی

۱- جلسات ارزیابی ریسک کیفی با حضور مدیر خط فرآیند، مهندسین کارخانه، مهندس مجرب بهداشت حرفه‌ای، متخصص سم‌شناسی شغلی و سایر افراد آشنا با موضوعات بهداشت کار، در قالب مشاور گروه برگزار شود. لازم است تا اطلاعات لازم به جهت توصیف وظایف شغلی و تعیین پتانسیل مواجهه با مواد شیمیایی از کارشناسان صنعت جمع‌آوری شود. سپس برای اطمینان از اطلاعات ارائه شده، سایت‌های تخصصی مهندسی بهداشت حرفه‌ای نیز واکاوی گردد. در مصاحبه با کارکنان، باید از آنها خواسته شود که تمام وظایف مرتبط با تولید یا استفاده از مواد شیمیایی را شرح دهند (از جمله مواد شیمیایی تولید شده یا مصرف شده در حین فعالیت‌های آماده‌سازی، تمیز کردن، دفع مواد شیمیایی یا فعالیت‌های تعمیرات و نگهداری).استاندارد نحوه انجام عملیات شغلی (SOP)[1] برای تمام مراحل تولید و وظایف شغلی با هدف شناسایی وجود محصولات شیمیایی در هر یک از این مراحل (مانند تولید مواد/محصولات، چسب‌ها، روان‌کننده‌ها، حلال‌ها و مواد شیمیایی لازم برای تعمیرات یا نگهداری ابزار و ماشین‌آلات) بررسی شوند. برای دستیابی به روش‌های SOP برای عملیات‌های مختلف صنعتی می‌توان به سایت اطلاعاتی زیر مراجعه نمود:

https://hrylabour.gov.in/staticdocs/labourpolicies/Standard%20Operating%20Procedures%20(SOPs)%20for%20safe%20operations%20on%20hazardous%20and%20dangerous%20manufacturing%20processes.pdf

۲- بررسی کامل از محل کار و مشاهده کارکنان در حین انجام وظایف شغلی برای اطمینان از درک کامل فرآیندهای کار با مواد شیمیایی و مواجهه با آنها، انجام شود.

[1] Standard Operating Procedures

۳- نحوه عملکرد سیستم‌های کنترل‌کننده آلاینده‌های شیمیایی محیط کار (مانند سیستم‌های کنترل مهندسی، مدیریتی و سایر اقدامات کنترلی از قبیل استفاده از تجهیزات حفاظت فردی) بررسی شود.

۴- مدت زمان انجام وظیفه کارکنان، تعداد دفعات انجام هر فعالیت و تغییرات موجود در انجام وظایف، شناسایی گردد.

۵- عناوین شغلی همه کارکنان در حین انجام وظایف مختلف و نیز نوع مواجهه گروه‌های شغلی مشابه گزارش شود.

- برای تعیین گروه‌های شغلی SEG لازم است اطلاعات مربوط به مسائل شغلی کارکنان متناسب با فرم اطلاعاتی شماره ۱ جمع‌آوری گردد. به‌طور کلی SEG ها دارای مشخصاتی به‌شرح زیر می‌باشند:

- **مشابهت در وظایف کاری: کارکنان در این گروه‌ها دارای وظایف شغلی یکسان می‌باشند.**
- **مشابهت در مواجهه با مواد مخاطره‌آمیز: کارکنان در این گروه‌ها از مواد شیمیایی مخاطره‌آمیز یکسان استفاده می‌کنند و دارای مواجهه بالقوه تقریباً مشابهی هستند. این مشابهت الزاماً در مورد شدت اثر بر سلامتی مطرح نیست، زیرا این امر به حساسیت افراد در معرض مواجهه بستگی دارد. به‌طور کلی، گروه‌های SEG فقط دارای ریسک مشابهی بر سلامت کارکنان هستند.**

۱- نوع و محل انجام کار گروه SEG:	۲-تاریخ بررسی:	<u>ملاحظات مربوط به گروه‌های SEG</u> آیا بهداشت فردی کارکنان رعایت می‌شود؟ آری/ خیر آیا جذب پوستی و گوارشی ترکیبات شیمیایی وجود دارد؟ آری/ خیر آیا بیماری شغلی در گروه‌های SEG گزارش شده است؟ آری/ خیر آیا افراد آسیب‌پذیر در گروه‌های SEG وجود دارند؟ آری / خیر
۳- نوع مواجهه با ترکیبات شیمیایی در گروه SEG:	۴- تعداد کارگران:	
۵- آیا مواجهه شغلی غیر منتظره امکان‌پذیر است؟	۷- نوع شیفت کاری: نرمال چرخشی	
	۸- ساعات کار شیفت:	
۶- مدت زمان و تعداد دفعات مواجهه با ترکیبات شیمیایی:	۱۰- امکان تماس شغلی غیر عادی برای کارکنان:	
۹- نظر کارگران در مورد سلامت خود و دیگران:	۱۲- کیفیت روش‌های کنترل مدیریتی: مناسب ☐ غیر مناسب ☐	
	۱۳- کیفیت وسایل حفاظت فردی گروه SEG:	
۱۱-کیفیت سیستم تهویه صنعتی بر اساس استاندارد: مناسب ☐ غیر مناسب ☐	۱۵- امکان مواجهه کارکنان با چند ترکیب به‌طور همزمان: آری ☐ خیر ☐	
	۱۶- نام ترکیبات و اثرات متقابل:	
۱۴- گزارش در مورد سلامت گروه SEG:		
سایر اطلاعات:		

شکل ۱-۴) فرم شماره-۱: مشخصات گروه شغلی SEG با شرایط مواجهه مشابه با مخاطرات شیمیایی

۴-۱-۴-۲) گام دوم: جمع‌آوری اطلاعات از گروه SEG

در این گام از فرایند QRA، اطلاعات زیر از فرم شماره-۱ که در گام قبلی تکمیل شده است، استخراج می‌گردد:

۱- نوع و میزان مواجهه کارکنان با مواد شیمیایی که بر اساس بررسی‌های محیطی و سایت‌های اطلاعاتی سازمان‌های معتبر بهداشت حرفه‌ای تشخیص داده شده، در فرم ثبت می‌گردد. با تحلیل اطلاعات به‌دست آمده از فرم پر شده، می‌توان تا حدودی در خصوص درستی مشاهدات برای تشخیص اعضای گروه‌های SEG استفاده نمود. در صورتی که اطلاعات متناقض در مورد گروه SEG از فرم پر شده به‌دست آید، بهتر است در انتخاب اعضای گروه تجدید نظر گردد.

۲- شرایط مواجهه کارکنان با ترکیبات شیمیایی از طریق بررسی‌های محیطی و متون علمی مشخص می‌شود.

۳- مسیر مواجهه کارکنان با مواد شیمیایی از طریق بررسی‌های محیطی تشخیص داده می‌شود (مواجهه از راه‌های غیرتنفسی نیز می‌بایست دقیقاً مشخص شده و در مراتب بعدی از ارزیابی ریسک کیفی و پیشنهادات کنترلی، موضوع مواجهه‌های غیرتنفسی به‌عنوان یکی از روش‌های کنترلی کارکنان مورد تأکید قرار داده شود).

۴- تعداد دفعات مواجهه با ترکیبات شیمیایی در روز، هفته و یا ماه.

۵- مدت زمان مواجهه با ترکیبات شیمیایی در روز، هفته و یا ماه

۶- وضعیت سلامت کارکنان که از طریق بررسی پرونده‌های پزشکی آنها.

۷- تعیین وضعیت عملکردی سیستم‌های تهویه صنعتی از طریق مقایسه با استانداردهای ارائه شده در کتاب مرجع تهویه صنعتی سازمان ACGIH

۸- بررسی وضعیت اقدامات کنترلی مدیریتی

۹- بررسی تناسب وسایل حفاظت فردی کارکنان با نوع و تراکم ترکیبات شیمیایی موجود در محیط کار و مقایسه با معیارهای سازمان NIOSH (NIOSH Pocket Guide to Hazardous Chemicals).

۴-۱-۴-۳) گام سوم: بررسی اثرات بالقوه ترکیبات بر سلامت کارکنان

اثرات بالقوه بر سلامت را می‌توان با استفاده از کدهای اعلام شده از سوی GHS به دست آورد. برای این منظور، ضریب خطر برای زیرگروه‌های هر یک از پیامدهای سلامتی منظور می‌گردد که در ادامه به طبقه‌بندی پیامدهای سلامتی از سوی GHS و ضریب خطر (HR) برای هر یک از زیرگروه‌های آن پرداخته می‌شود.

۴-۱-۴-۳-۱) ضریب خطر برای ترکیبات شیمیایی با پیامد سلامتی از نوع مسمومیت حاد

- قابلیت بروز اثرات سلامتی از طریق دریافت خوراکی و یا جذب پوستی یک دُز یا دُزهای متعدد از ترکیبات شیمیایی در عرض ۲۴ ساعت (در قالب LD_{50}) تحت عنوان مسمومیت حاد[1] مطرح می‌باشد.
- قابلیت بروز اثرات سلامتی از طریق دریافت استنشاقی یک دُز یا دُزهای متعدد از ترکیبات شیمیایی در عرض ۲۴ ساعت (در قالب LC_{50}) عنوان مسمومیت حاد مطرح می‌باشد.
- به‌طور کلی پیامد سلامتی از نوع مسمومیت حاد، در ۵ زیر گروه (با درجات سمیت متفاوت) و بر اساس مقادیر LD_{50} (خوراکی، پوستی) یا LC_{50} (استنشاقی) طبقه‌بندی می‌شود که در جدول ۱-۴ به آن اشاره شده است. بر اساس استاندارد سیستم GHS، گروه‌های ۱ الی ۵ از این پیامد سلامتی، دارای HR به ترتیب ۴ الی ۰ می‌باشند (جدول ۱-۴).

جدول ۱-۴) زیرگروه‌های ترکیبات شیمیایی دارای اثرات حاد بر سلامتی بر اساس راه‌های مواجهه با آنها

راههای مواجهه	گروه ۱ HR = ۴	گروه ۲ HR = ۳	گروه ۳ HR = ۲	گروه ۴ HR = ۱	گروه ۵ HR = ۰
خوراکی (kg/mg وزن بدن)	۵	۵۰	۳۰۰	۲۰۰۰	۵۰۰۰
پوستی (kg/mg وزن بدن)	۵۰	۲۰۰	۱۰۰۰	۲۰۰۰	-
گازها (ppm)	۱۰۰	۵۰۰	۲۵۰۰	۲۰۰۰۰	-
بخارات (mg/l)	۰.۵	۲	۱۰	۲۰	-
گردوغبار و میست‌ها (mg/l)	۰.۰۵	۰.۵	۱	۵	-

[1] Acute Toxicity

۴-۱-۴-۳-۲) ترکیبات شیمیایی سرطان‌زا و دارای اثرات بالقوه بر سیستم تولید مثل

GHS، ترکیبات سرطان‌زا و یا ترکیبات دارای اثر بر سیستم تولید مثل[۱] را بر اساس جدول ۲-۴ طبقه‌بندی می‌کند که آن را بر اساس ویژگی‌های ذاتی این ترکیبات و قوت شواهد موجود انجام می‌دهد. لازم به‌ذکر است که سیستم GHS فقط اطلاعاتی را در مورد احتمال سرطان‌زایی یک ماده شیمیایی ارائه می‌نماید ولی این اطلاعات میزان بروز ریسک ابتلا به سرطان در انسان را نشان نمی‌دهد. معیارهای طبقه‌بندی GHS تا حد زیادی با معیارهای آژانس بین‌المللی تحقیقات سرطان (IARC) و برنامه ملی سم‌شناسی (NTP)[۲] مشابهت دارد (جدول ۲-۴). سیستم GHS خطرات بالقوه ترکیبات سرطان‌زا را فقط در دو گروه ۱ و ۲ با ضرایب خطر HR=۴ و متوسط HR=۳ اعلام می‌نماید و در حال حاضر در مورد ترکیبات دیگر مطلبی را ارائه نمی‌دهد.

جدول ۲-۴) طبقه‌بندی سرطان‌زاها و زیر گروه‌های آن بر اساس سیستم GHS و سازمان IARC

گروه ۱) سرطان‌زاهای قطعی و سرطان‌زاهای احتمالی 2A HR=۴		گروه۲) ترکیبات مشکوک به سرطان‌زایی HR=۳
سرطان‌زاهای قطعی	سرطان‌زاهای احتمالی 2A	گروه-2B
سرطان‌زای قطعی انسانی بر اساس شواهد جمع‌آوری شده از مطالعه در جوامع انسانی	سرطان‌زای احتمالی انسانی بر اساس شواهد سرطان‌زایی در حیوان	دارای شواهد محدود برای سرطان‌زایی در انسان یا حیوان

۴-۱-۴-۳-۳) ترکیبات شیمیایی مولد جهش ژنتیکی در سلول های زاینده

بر اساس سیستم GHS، ترکیبات شیمیایی مولد جهش ژنتیکی در سلول‌های زاینده[۳] که ممکن است باعث جهش ژنتیکی در سلول‌های زایای انسانی شوند در دو گروه ۱ و ۲A با خطر بسیار زیاد و گروه (۲B) با خطر زیاد طبقه‌بندی شده‌اند (جدول ۳-۴).

---

[1] Carcinogenicity or Reproductive Toxicity
[2] National Toxicology Program
[3] Genotoxicity/ Mutagenicity

جدول ۳-۴) ترکیبات شیمیایی مولد جهش ژنتیکی و گروه‌بندی آنها

گروه ۱) ترکیبات جهش زای ژنتیکی قطعی یا احتمالی در سلول‌های انسانی HR=۴		گروه۲) مشکوک به جهش زایی ژنتیکی HR=۳
گروه ۱	گروه 2A	گروه 2B
شواهد مثبت به دست آمده از مطالعات اپیدمیولوژیکی	نشان‌دهنده نتایج مثبت به‌دست‌آمده از مطالعات in vivo بر روی سلول‌های کالبدی انسان همراه با برخی از شواهد در مورد جهش‌زایی سلول‌های بدن.	شواهد مثبت در آزمایش‌های سلول‌های کالبدی پستانداران و نتایج جهش ژنتیکی به‌دست‌آمده از برخی از آزمون‌های in vivo و مطالعات in vitro.

۴-۱-۴-۳-۴) ترکیبات شیمیایی مولد سمیت تولید مثل و اختلالات رشدی

سیستم GHS اختلالات رشد و سمیت سیستم تولید مثلی[1] را در دو گروه مختلف مطرح می‌کند. در اهداف طبقه‌بندی GHS، سمیت باروری به‌عنوان اثرات نامطلوب بر عملکرد باروری مردان و زنان بالغ تعریف شده است. همچنین، اثرات نامطلوب از طریق شیردهی نیز در سمیت تولید مثلی گنجانده می‌شود. با این حال، GHS با اثرات شیردهی به‌طور جداگانه رفتار می‌کند، به‌طوریکه می‌توان یک هشدار برای خطر خاص به مادران شیرده ارائه کرد. معیارهای GHS برای سمیت باروری شامل قرار دادن مواد در یکی از دو دسته بر اساس قوت شواهد موجود است (جدول ۴-۴). GHS خطرات بالقوه ترکیبات شیمیایی را بر سیستم تولید مثل، در چهار گروه ۱، A۲، B۲ و ۳ و به‌ترتیب دارای مقادیر ضریب خطر زیاد و متوسط اعلام می‌نماید.

[1] Reproductive toxicity

جدول ۴-۴) معیارهای GHS برای طبقه‌بندی سمیت تولید مثل ترکیبات شیمیایی

دارای اثرات قطعی یا احتمالی بر سیستم تولیدمثل یا رشد انسان HR=۴		مشکوک به اثرات مخرب در سیستم تولید مثل انسان یا رشد HR=۳	اثرات سلامتی ایجاد شده از طریق شیردهی HR=۲
گروه ۱	گروه 2A	گروه 2B	گروه ۳
دارای اثرات قطعی بر انسان	دارای اثرات احتمالی در حیوانات آزمایشگاهی	بر اساس اطلاعات ارائه شده در جامعه انسانی و یا بر روی حیوانات آزمایشگاهی و احتمالاً سایر اطلاعات	-

۴-۱-۴-۳-۵) ترکیبات شیمیایی تحریک‌کننده پوست، خورنده پوست و یا آسیب جدی چشم

بر اساس تقسیم‌بندی GHS، ترکیبات تحریک‌کننده، عوامل خورنده یا دارای قابلیت ایجاد آسیب‌های جدی به چشم[1]، در سه گروه ۱، ۲ و ۳ قرار می‌گیرند.

۴-۱-۴-۳-۶) حساس‌کننده‌های سیستم تنفسی

GHS معیارهایی از حساسیت تنفسی ایجاد شده توسط ترکیبات شیمیایی را ارائه می‌دهد. در این سیستم، حساس‌کننده تنفسی[2] به یک ماده شیمیایی گفته می‌شود که به دنبال مواجهه تنفسی منجر به حساسیت مفرط می‌گردد. حساس‌کننده‌های سیستم تنفسی بر اساس طبقه‌بندی GHS فقط در گروه ۱ و به‌صورت دو زیر گروه 1A (دارای شواهد کافی انسانی از بروز حساسیت) و 1B (دارای شواهد مثبت و مناسب به دست آمده از مطالعات حیوانی) ارائه می‌شود. حساسیت بیش از حد تنفسی معمولاً تحت عنوان آسم شناخته می‌شود، اگرچه سایر واکنش‌های حساسیت بیش از حد مانند رینیت[3]، کانژونکتیویت[4] و آلوئولیت[5] در گروه‌های 1A و 1B و با HR=۴ در نظر گرفته می‌شوند.

---
[1] Skin Irritant, Corrosive or Serious Eye Damage
[2] Respiratory Sensitivity
[3] rhinitis
[4] conjunctivitis
[5] alveolitis

۴-۱-۴-۳-۷) حساس‌کننده‌های پوست

GHS، حساس‌کننده‌های پوستی[1] را بر اساس ارائه شواهد به دست آمده از بروز پیامدهایی بر سلامت پوستی از طریق مواجهه با ترکیبات شیمیایی مطرح می‌نماید. حساس‌کننده پوستی به‌عنوان یک ماده شیمیایی تعریف می‌شود که پس از تماس، منجر به بروز واکنش آلرژیک می‌شود. حساسیت در واقع یک مرحله القایی است که در آن سیستم ایمنی یاد می‌گیرد که نسبت به یک ماده شیمیایی واکنش نشان دهد. به دنبال آن، یک مرحله برانگیختگی ایجاد می‌شود که در این حالت، پس از مواجهه بعدی با ماده شیمیایی در همان غلظت یا حتی غلظت‌های کمتر، علائم بالینی ظاهر می‌شود. در صورت وجود داده‌های کافی، حساس‌کننده‌ها را می‌توان به زیر گروه‌های 1A و 1B طبقه‌بندی کرد. حساس‌کننده‌های پوستی در سیستم GHS در هر دو زیر گروه 1A و 1B معمولاً در گروه ۱ و دارای HR=۴ قرار می‌گیرند.

ترکیبات حساس‌کننده گروه یک دارای اثرات سلامتی به‌شرح زیر می‌باشند:

الف) شواهد انسانی نشان می‌دهد که تماس پوستی با این ماده می‌تواند باعث بروز حساسیت در تعداد قابل توجّهی از افراد شود.

ب) نتایج مثبتی از حساسیت‌زایی از مطالعات جامع بر روی حیوانات آزمایشگاهی ارائه شده است.

بر اساس نتایج مطالعات، مواد شیمیایی در زیر گروه 1A نشان‌دهنده حساسیت‌زایی بسیار زیاد در انسان و یا حیوانات آزمایشگاهی است و می‌توان انتظار داشت که به‌طور بالقوه باعث ایجاد حساسیت قابل توجّهی در انسان شود.

بر اساس گزارش‌های منتشر شده، مواد شیمیایی در زیر گروه 1B دارای حساسیت‌زایی کم تا متوسط در انسان و یا حیوانات آزمایشگاهی هستند و می‌توان انتظار داشت که به‌طور بالقوه باعث حساسیت قابل توجّهی در انسان شوند.

---

[1] Skin Sensitivity

۴-۱-۴-۳-۸) اثرات سمی در اندام هدف به دنبال مواجهه منفرد یا مکرر

بر اساس تقسیم‌بندی GHS، ترکیبات دارای اثرات سمی در اندام هدف به دنبال مواجهه منفرد یا مکرر[1] می‌تواند اثرات سمی قابل توجّهی را در اندام‌های خاصی از بدن ایجاد کند و عملکرد ارگان هدف را به‌صورت فوری و یا با تأخیر و همچنین به‌صورت برگشت‌پذیر و یا غیرقابل برگشت مختل کند. سیستم عصبی مرکزی یکی از اندام‌های اصلی مورد هدف این گروه از ترکیبات است. از اندام‌های مهم دیگر در این زمینه می‌توان به سیستم گردش خون، کبد، کلیه‌ها، ریه‌ها، پوست و همچنین ماهیچه‌ها و استخوان‌ها اشاره کرد. انواع سموم سیستمیک که ارگان خاصی را مورد هدف قرار می‌دهند به‌شرح زیر می‌باشند:

- **Hepatotoxins= سمومی که به کبد آسیب می‌رسانند از قبیل نیتروزآمین‌ها، تتراکلرید کربن**
- **Nephrotoxins= سمومی که به کلیه آسیب می‌رسانند از قبیل برخی از هیدروکربن‌های هالوژنه**
- **Neurotoxins= سمومی که باعث آسیب به سیستم عصبی می‌گردند از قبیل جیوه، آکریلامید و کربن دی‌سولفید**
- **Hematopoietic agents= سمومی که باعث کاهش ظرفیت کاری هموگلوبین می‌شود و یا بافت‌های بدن را از دریافت اکسیژن محروم می‌نماید از قبیل ترکیبات کربن مونوکسید و سیانیدها**
- **Respiratory Toxicants= سمومی که باعث آسیب و خرابی بافت‌های ریوی می‌شود از قبیل الیاف آزبست و ذرات ریز سیلیس کریستالی**

سیستم GHS این ترکیبات را در قالب سه زیر گروه ۱، ۲ و ۳ و HR به ترتیب ۴، ۳ و ۲ مطرح می‌نماید.

همان‌طور که پیش‌تر گفته شد، سیستم GHS ترکیبات را به هفت دسته سم‌شناسی طبقه‌بندی کرده است و برای هر دسته از این ترکیبات، زیرگروه‌هایی تعیین نموده است که در این زیرگروه‌ها، میزان سمیت هر ترکیب از درجات زیاد برای گروه ۱ تا درجات ناچیز برای گروه ۵ مشخص می‌شود (جدول ۵-۴). لازم به ذکر است که سیستم GHS، علی‌رغم اطلاعات مدون سم‌شناسی برای طبقه‌بندی برخی ترکیبات شیمیایی، گاهی فقط از یک یا دو زیرگروه استفاده می‌کند. تخمین درجه سمیت ترکیبات در طبقات مختلف، مستلزم گردآوری اطلاعات کافی در زمینه سم‌شناسی ترکیبات مصرفی و تولیدشده در حین فرآوری مواد اولیه است. در این زمینه توصیه می‌شود از مشورت متخصصان سم‌شناسی شغلی بهره گرفته شود.

[1] Specific Target Organ Toxicity

جدول ۵-۴) طبقه‌بندی ترکیبات شیمیایی بر اساس سیستم GHS و ضریب خطر آنها

گروه ۱ سمیت حاد	گروه ۲ سرطان‌زایی و سمیت سیستم تولید مثل	گروه ۳ تحریک و خوردگی پوست یا آسیب جدی به چشم	گروه ۴ حساس کننده‌های سیستم تنفسی	گروه ۵ حساس کننده‌های پوست	گروه ۶ جهش‌زایی سلول‌های زاینده	گروه ۷ سمیت اندام‌ها در مواجهه منفرد یا تکراری	گروه ۸ غلظت کشنده LC_{50} بر حسب ppm	شرح سمیت گروه‌ها و زیر گروه‌های ترکیبات شیمیایی
							>۲۰۰۰۰	به‌طور معمول غیرسمی HR=۰
 گروه ۴							≤۲۰۰۰ و >۳۰۰	سمیت کم HR=۱
 گروه ۳		 گروه ۳				 گروه ۳	≤۳۰۰ و >۵۰	سمیت متوسط HR=۲
 گروه ۲	 گروه ۲	 گروه ۲			 گروه ۲	 گروه ۲	≤۵۰ و >۵	سمیت زیاد HR=۳
 گروه ۱	 گروه 1A و 1B	 گروه ۱	 گروه 1A و 1B	 گروه ۱	 گروه 1A و 1B	 گروه ۱	≤۵	سمیت بسیار زیاد HR=۴

سمیت حاد- گرو ه ۱) سمیت حاد گازها و بخارات ppm ۱۰۰، گرد و غبار و میست mg/L ۰.۰۵ از راه پوستی mg/kg ۵۰ از راه mg/kg ۵.

سمیت حاد- گرو ه ۲) سمیت حاد گازها و بخارات ppm ۵۰۰، گرد و غبار و میست mg/L ۰.۵ از راه پوستی mg/kg ۲۰۰ از راه mg/kg ۵۰.

سمیت حاد- گرو ه ۳) سمیت حاد گازها و بخارات ppm ۲۵۰۰، گرد و غبار و میست mg/L ۱ از راه پوستی mg/kg ۱۰۰۰ از راه mg/kg ۳۰۰.

سمیت حاد- گرو ه ۴) سمیت حاد گازها و بخارات ppm ۵۰۰۰، گرد و غبار و میست mg/L ۵ از راه پوستی mg/kg ۲۰۰۰ از راه mg/kg ۲۰۰۰.

سرطان‌زا- گرو ه 1A) سرطان‌زا بر اساس شواهد بر روی جمعیت انسان.

سرطان‌زا- گرو ه 1B) سرطان‌زا بر اساس شواهد مطالعات در جمعیت حیوانی.

محرک پوستی-گروه ۱) شواهد بسیار زیاد در مطالعات انسانی و همچنین مطالعات حیوانی.

حساس‌کننده تنفسی-گروه 1A) احتمال وقوع بیماری به میزان زیاد.

حساس‌کننده تنفسی-گروه 1B) احتمال وقوع بیماری به میزان متوسط.

حساس‌کننده پوستی-گروه ۱) شواهد قوی در مطالعات انسانی و حیوانی.

جهش‌زایی سلول‌های زاینده-گروه 1A) جهش زای سلول‌های زاینده انسان شناخته شده است.

جهش‌زایی سلول‌های زاینده -گروه 1B) می‌تواند باعث ایجاد جهش‌زایی در سلول‌های زاینده انسان شود.

جهش‌زایی سلول‌های زاینده-گروه ۲) نگرانی‌هایی برای ایجاد جهش‌زایی در سلول‌های زاینده انسان وجود دارد.

سمیت اندام‌ها در مواجهه منفرد یا تکراری-گروه ۱) شواهد قوی علمی انسانی برای ایجاد عوارض بر اندام هدف در مواجهه مقطعی و تکراری.

سمیت اندام‌ها در مواجهه منفرد یا تکراری-گروه ۲) شواهد قوی علمی برای ایجاد عوارض بر اندام هدف در مواجهه مقطعی و تکراری.

سمیت اندام‌ها در مواجهه منفرد یا تکراری-گروه ۳) اثرات تخدیری و تحریک‌کنندگی سیستم تنفسی

۴-۱-۴-۴) گام چهارم: جمع‌آوری اطلاعات ترکیبات شیمیایی مورد استفاده در فرایندهای شغلی

اطلاعات مربوط به ترکیبات شیمیایی اولیه، بینابینی و نهایی باید از طریق اطلاعات فرایندهای مشابه شغلی مندرج در سایت‌های تخصصی مهندسی بهداشت حرفه‌ای تکمیل شود. سپس کد GHS ترکیبات از مراجع اطلاعاتی زیر به دست آید:

- برگه‌های SDS با فرمت سازمان OSHA که حاوی کدهای GHS است می‌بایست برای همه مواد استفاده شده یا تولید شده در فرآیندهای صنعتی یا خدماتی استخراج شود.
- مشخصات شیمیایی و فیزیکی ترکیبات و همچنین مقدار مصرف روزانه کلیه محصولات شیمیایی مورد استفاده در گروه‌های شغلی SEG باید از مراجع اطلاعاتی (برگه‌های SDS) و بازرسی‌های محیط کار مشخص شوند.
- اطلاعات ترکیبات شیمیایی فرایندهای کاری در فرم شماره ۲ ثبت گردد.

عنوان شغلی گروه SEG	نام ترکیب یا ترکیبات	مشخصات فیزیکی و شیمیایی ترکیب	کد GHS ترکیب و طبقه سمیت	مقدار مصرفی روزانه ترکیبات در گروه‌های SEG	سیستم‌های کنترل‌کننده	ملاحظات

شکل ۲-۴) فرم شماره-۲: مشخصات مواد شیمیایی مورد استفاده یا تولید شده در فرایندهای شغلی

۴-۱-۴-۵) گام پنجم: بررسی طبقه‌بندی سمیت ترکیبات و ضرایب خطر (HR) از گام های سوم و چهارم

پس از شناسایی ترکیبات مورد استفاده در فرآیند کاری و بررسی برگه‌های SDS و یافتن شماره کد GHS ترکیب، ضرایب خطر آنها با توجّه به میزان سمیت آنها تعیین می‌گردد (سمیت خیلی زیاد: ضریب ۴، سمیت زیاد: ضریب ۳، سمیت متوسط: ضریب ۲، سمیت کم: ضریب ۱، و سمیت ناچیز: ضریب صفر) (جدول ۵-۴). همان‌طور که پیش‌تر ذکر شد، اطلاعات مورد نیاز باید از مشخصات مندرج در برگه‌های SDS شرکت‌های تهیه‌کننده ترکیبات شیمیایی استخراج گردد. لازم به یادآوری است که تعیین ضرایب خطر ترکیبات با بررسی

کامل خواص سم‌شناسی آنها انجام می‌شود و این امر به دلیل نیاز به تخصص سم‌شناسی، باید به‌صورت گروهی و با مشاوره کارشناسان باتجربه انجام شود.

برگه‌های SDS بر اساس قوانین ایمنی و بهداشت کشورها غالباً از طرف شرکت‌های تولیدکننده محصولات شیمیایی ارائه می‌شود. در شرایطی که کد GHS ترکیب شیمیایی از مراکز صنعتی و یا برگه‌های SDS قابل استخراج نباشد، می‌توان برای آن کد مشابهی را بر مبنای اثرات بالقوه و با توجّه به اطلاعات سم‌شناسی آن ترکیب، توسط کارشناسان باتجربه تعیین نمود. همچنین استفاده از سایت تخصصی زیر برای یافتن کد GHS و اطلاعات مربوط به یک ترکیب شیمیایی خاص توصیه می‌شود:

https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/ghs/

در شرایطی که فقط کد R-Phrase ترکیب شیمیایی (بر اساس استاندارد اروپایی EEC/۶۷/۵۴۸) در برگه‌های SDS ذکر شده باشد، کد GHS را می‌توان با استفاده از جداول اطلاعاتی که در بخش ضمیمه شماره-۱ آورده شده است، شناسایی کرد. در صورتی که اثرات سم‌شناسی یک ترکیب شیمیایی مشخص نشده باشد، آن ترکیب نمی‌تواند کدگذاری شود و طبق قانون، تا زمان دستیابی به چنین اطلاعاتی نباید در محیط‌های شغلی مورد استفاده قرار گیرد (فرم شماره-۳).

نوع ترکیب شیمیایی	H-CODE	طبقه‌بندی خطر ترکیب	طبقه منتسب به اجزای ترکیب	HR
رنگ	H361	گروه-۲) سیستم تناسلی	۳	۳
	H335	گروه-۳) سمیت برای ارگان‌های هدف*	۳	
	H336	گروه-۲) سمیت برای ارگان‌های هدف	۲	
حلال رقیق‌کننده	H361	گروه-۲) سیستم تناسلی	۳	۴
	H372	گروه-۱) سمیت برای ارگان‌های هدف گروه-۴) اعصاب مرکزی، کلیه و کبد	۴	

مخلوط رنگ	H361	گروه-۲) سیستم تناسلی	۳	۴
	H335	گروه-۲) سیستم تناسلی	۳	
	H336	گروه -۳) سمیت برای ارگان‌های هدف	۳	
	H372	گروه-۱) اعصاب مرکزی، کلیه و کبد	۴	

شکل ۳-۴) فرم شماره-۳: نمونه‌ای از تعیین HR یک محصول شیمیایی در ارزشیابی مواجهه شغلی

۴-۱-۴-۶) گام ششم: رتبه‌بندی میزان مواجهه کارکنان با ترکیبات شیمیایی در گروه‌های SEG

کارکنان گروه SEG از طریق مسیرهای مختلف تنفسی، گوارشی و پوستی در معرض مواجهه با ترکیبات شیمیایی در محیط کار قرار می‌گیرند. برای ارزیابی کیفی، لازم است میزان مواجهه (ER) آنها در گروه‌های مرتبط شغلی رتبه‌بندی شود. هدف از این رتبه‌بندی، ارزیابی پتانسیل جذب ترکیبات مخاطره‌آمیز توسط بدن و تأثیر آن بر سلامت است.

در این کتاب، به ارزیابی ریسک کیفی با استفاده از اطلاعات مواجهه استنشاقی کارکنان با مواد شیمیایی پرداخته می‌شود. در صورت وجود اطلاعات مبنی بر جذب پوستی یا گوارشی ترکیبات از طریق مشاهدات کارشناسی یا نتایج پایش بیولوژیکی کارکنان، رتبه مواجهه با ترکیبات یک سطح بالاتر در نظر گرفته می‌شود. به این ترتیب، اگر ER برای یک ترکیب شیمیایی برابر با ۳ به‌دست آید اما احتمال مواجهه پوستی و گوارشی برای آن وجود داشته باشد، رتبه مواجهه برای آن معادل ۴ در نظر گرفته می‌شود .(4=ER) در صورتیکه ER برابر با ۴ باشد، ERنهایی حتی با وجود اطلاعات جذب پوستی و گوارشی معادل همان ۴ در نظر گرفته می‌شود.

برای تعیین میزان ضریب مواجهه شغلی کارکنان در گروه‌های SEG، مراحل زیر انجام می‌گیرد:

مرتبه ۱ شناسایی خواص شیمیایی و فیزیکی ترکیبات و تکمیل فرم شناسایی شماره-۲

مرتبه ۲ تعیین ضریب ورود ترکیبات شیمیایی به‌صورت گاز و بخار و یا ذرات ریز در هوای محیط کار

الف- تعیین ضریب تبخیر ترکیبات آلی فرار بر اساس ویژگی فشار بخار
ب- تعیین ضریب پراکنش مواد جامد و مایع و تولید آئروسل‌ها (گرد و غبار، دمه فلزات و میست) براساس مشاهدات کارشناسی مبتنی بر مستندات و حدود تقریبی تراکم این ترکیبات در محیط کار (تراکم گرد و غبار را می‌توان بر اساس میزان مصرف مواد پودری تعیین نمود که در نتیجه فراوری در حین کار مبدل به گرد و غبار می‌شوند).

مرتبه ۳ بررسی کیفیت سیستم‌های کنترل‌کننده* (فنی مهندسی و مدیریتی) و تعیین ضریب سیستم یا سیستم‌های کنترل‌کننده

مرتبه ۴ تعیین ضرایب تعداد دفعات مواجهه و مدت زمان مواجهه

مرتبه ۵ تخمین رتبه مواجهه بر اساس حاصل‌ضرب ضرایب تعداد دفعات مواجهه و مدت زمان مواجهه، میزان ورود ترکیبات شیمیایی به‌صورت گاز و بخار و یا ذرات ریز در هوای محیط کار و در آخر کیفیت سیستم کنترلی

مرتبه ۶ تعدیل رتبه مواجهه تخمین زده شده بر اساس اطلاعات جذب پوستی یا گوارشی و یا میزان فعالیت فیزیکی کارکنان

*با توجّه به عدم امکان نظارت بر نحوه صحیح استفاده از وسایل حفاظت فردی، این آیتم کنترلی در تعدیل رتبه مواجهه مطرح نیست.

جدول ۶-۴) تعیین ضریب تبخیر ترکیبات بر اساس فشار ترکیب در شرایط استاندارد اتمسفریک

ضریب تبخیر	فشار بخار در ۲۰ °C	
۱	۳۳ mbar	<۲۵ mmHg
۲	۳۳-۱۳۳ mbar	۲۵-۱۰۰ mmHg
۳	۱۳۳-۳۳۳ mbar	۱۰۰-۲۵۰ mmHg
۴	>۳۳۳ mbar	>۲۵۰ mmHg

جدول ۷-۴) تعیین ضریب پراکنده شدن مواد جامد و مایع در هوای محیط کار بر اساس میزان مواجهه کارکنان و مقدار مواد استفاده شده

ضریب پراکنده شدن مواد جامد	تخمین مواجهه کارکنان* mg/m³	تعیین تراکم آئروسل هوای کارگاه و مقدار مواد پودری استفاده شده به شیوه مشاهده‌ای
انتشار کم یا متوسط آئروسل زمانی که از مواد جامد در حد گرم در فرایند استفاده می‌شود	۰.۱ – ۰.۰۱	۱
انتشار کم آئروسل زمانی که از مواد جامد در حد کیلوگرم در فرایند استفاده می‌گردد	۱ – ۰.۱	۲
انتشار متوسط یا زیاد آئروسل زمانی که از مواد جامد در حد تن در فرایند استفاده می‌گردد	۱ - ۱۰	۳
انتشار متوسط یا زیاد آئروسل زمانی که از مواد جامد در حد تن در فرایند استفاده می‌شود	۱۰ - ۱۰۰	۴

* تخمین تراکم گرد و غبار بهتر است به‌صورت کارشناسی انجام شود. برای این منظور توصیه می‌شود که ضریب پراکندگی ترکیبات با استفاده از بررسی‌های واقعی و اندازه‌گیری به‌صورت استنشاقی یا تنفسی، استخراج از مطالعات قبلی، و در صورت امکان با استفاده از دستگاه‌های قرائت مستقیم انجام شود.

۴-۱-۴-۷) گام هفتم: استخراج اطلاعات فیزیکی و شیمیایی ترکیبات از برگه‌های SDS

برای این منظور می‌بایست مراحل زیر انجام شود:

- ✓ بعد از شناسایی ترکیبات شیمیایی در گروه‌های SEG، اطلاعات فیزیکی و شیمیایی آنها می‌بایست از برگه‌های SDS استخراج شود (فرم شماره-۲).
- ✓ ضریب تبخیر ترکیبات آلی فرار (گازها و بخارات) بر اساس فشار بخار ترکیب تعیین گردد (جدول ۶-۴).
- ✓ در صورتی که آلودگی هوای محیط به‌صورت گرد و غبار مطرح باشد، ضریب پراکندگی ذرات بر اساس مشاهدات کارشناسی از محیط، سوابق اندازه‌گیری تراکم گرد و غبار محیطی، تجربیات کارشناس از مطالعات گذشته، یا کاربرد دستگاه‌های قرائت مستقیم و مقدار مواد استفاده شده در فرآیند کاری تخمین زده شود (جدول ۷-۴).

وضعیت سیستم‌های کنترل‌کننده ترکیبات شیمیایی در محیط کار (اعم از سیستم‌های تهویه صنعتی، کنترل‌های مدیریتی و وسایل حفاظت فردی به‌عنوان تعیین‌کننده میزان مواجهه کارکنان) می‌بایست بررسی گردد. به‌منظور ارزشیابی سیستم تهویه صنعتی و همچنین ارزشیابی سیستم کنترل مدیریتی، به ترتیب به فصل سوم و فرم‌های ۲ و ۳ مراجعه شود. کارآیی سیستم‌های حفاظت فردی مورد استفاده نیز می‌بایست بر اساس نورم سازمان NIOSH و تراکم پیش‌بینی‌شده ترکیبات شیمیایی بررسی شود.

از آنجایی که کیفیت سیستم‌های کنترلی بر میزان مواجهه کارکنان مؤثر است، ضریب مرتبط با سیستم‌های کنترلی را می‌توان با مشاهدات کارشناسی و به کمک اطلاعات مندرج در جدول ۸-۴ به‌دست آورد.

جدول ۸-۴) تعیین ضریب کیفیت سیستم‌های کنترلی ترکیبات شیمیایی

ضریب سیستم کنترلی	شرح سیستم تهویه صنعتی و سایر سیستم‌های کنترلی
سیستم تمام بسته تهویه صنعتی استاندارد و با میزان ورود ناچیز آلاینده‌های شیمیایی به محیط کار	۰
الف) سیستم نیمه بسته تهویه موضعی با کارآمدی مؤثر برای تخلیه آلاینده‌ها از محیط کار طبق استاندارد کتاب تهویه صنعتی سازمان ACGIH ب) وجود سیستم‌های کنترل مدیریتی و تجهیز کارکنان به وسایل حفاظت فردی در حد استاندارد سازمان NIOSH	۱
الف) سیستم تهویه موضعی باز و با کیفیت استاندارد برای تخلیه ترکیبات آلاینده‌ها از محیط کار طبق استاندارد کتاب تهویه صنعتی سازمان ACGIH ب) وجود سیستم‌های کنترل مدیریتی و تجهیز کارکنان به وسایل حفاظت فردی در حد استاندارد سازمان NIOSH	۲
الف)سیستم تهویه موضعی باز راندمان تخلیه ترکیبات آلاینده‌ها در میزان زیر استاندارد طبق کتاب تهویه صنعتی سازمان ACGIH ب) وجود سیستم‌های کنترل مدیریتی و تجهیز کارکنان به وسایل حفاظت فردی در حد استاندارد سازمان NIOSH	۳
سیستم تهویه باز به‌صورت غیرکارآمد و نبود سایر سیستم‌های کنترلی	۴

نکته اول: کنترل مدیریتی بر اساس موازین دانشگاه آلبرتا تعیین می‌شود (ضمیمه شماره-۲).

نکته دوم: کیفیت وسایل حفاظت فردی کارکنان بر اساس نوع ترکیب شیمیایی و ضرایب ایمنی[1] و بر اساس دستورالعمل NIOSH با عنوان NIOSH Pocket Guide For Chemical Hazards تعیین می‌شود.

[1] Approved Protection Factor۵

✓ دو پارامتر مهم دیگر در مورد تعیین ضریب مواجهه، برآورد ضرایب تعداد دفعات و مدت زمان مواجهه در مشاغل SEG (فرم شماره-۱) است که می‌تواند طبق اطلاعات مندرج در جدول ۹-۴ تعیین شود.

جدول ۹-۴) تعیین ضریب مدت زمان و تعداد دفعات انجام وظایف

مدت زمان انجام وظایف	تعداد دفعات انجام یک وظیفه خاص در مواجهه با ترکیبات شیمیایی		
	روزانه	چندین روز در هر روز ماه	حدود یک روز در ماه
دقیقه ۱۵>	۱	۱	۱
۱۵ دقیقه - ۱ ساعت	۲	۲	۱
۱ ساعت - ۲ ساعت	۳	۲	۱
۲ ساعت - ۴ ساعت	۴	۳	۱
ساعت ۴ <	۵	۴	۱

اطلاعات مربوط به پارامترهای اصلی مواجهه مانند میزان تبخیر ترکیبات آلی فرار و یا مشاهدات کارشناسی ورود اجسام ذره‌ای، کیفیت سیستم‌های کنترلی و مدت زمان و تعداد دفعات انجام وظایف می‌بایست در فرم شماره-۴ ثبت شود.

گروه SEG	ترکیب شیمیایی	تعداد دفعات و مدت زمان مواجهه	تراکم ترکیب در هوای محیط (گاز، بخار و ذرات)	سیستم‌های کنترل‌کننده	حاصلضرب پارامترهای مواجهه	ملاحظات

شکل ۴-۴) فرم شماره-۴: اطلاعات ضرایب مواجهه و حاصلضرب پارامترهای آن

✓ رتبه مواجهه بر اساس حاصل‌ضرب پارامترهای میزان ورود گازها یا اجسام ذره‌ای، کیفیت سیستم‌های کنترلی، تعداد دفعات و مدت زمان انجام وظایف و مقایسه با جدول راهنما تعیین می‌شود (جدول ۱۰-۴). در صورت دریافت اطلاعات برای جذب پوستی یا گوارشی و یا فراتر رفتن داده‌های پایش بیولوژیکی از

مقادیر BEI مربوطه از طریق مشاهدات کارشناسی یا دریافت اطلاعات پایش بیولوژیکی کارکنان، میزان مواجهه با ترکیبات یک پله بالاتر محاسبه می‌شود، مشروط بر آن که ER بیشتر از عدد چهار نشود.

جدول ۱۰-۴) برآورد ER از حاصلضرب پارامترهای مختلف

ER	ضریب مواجهه کل
ناچیز	۱۰>
۱	۱۰-۲۰
۲	۲۱-۳۰
۳	۳۱-۴۰
۴	۴۰<

۴-۱-۴-۸) گام هشتم: تشخیص ریسک بر اساس ضرایب خطر و مواجهه و ماتریس ریسک

تشخیص میزان ریسک با توجّه به رتبه مواجهه (ER) در دامنه عددی بین ۰ تا ۴ و رتبه خطر (HR) در دامنه عددی بین ۰ تا ۴ به دست می‌آید (جدول ۱۱-۴) و سپس با استفاده از جدول راهنما، به درجه ریسک تبدیل می‌شود (جدول ۱۲-۴).

جدول ۱۱-۴) تعیین ریسک در گروه‌های SEG با توجّه رتبه های خطر و مواجهه و همچنین ماتریس ریسک

گروه شغلی SEG	ترکیب شیمیایی	رتبه خطر (HR)	رتبه مواجهه (ER)	عدد ریسک (HR× ER)	ملاحظات جذب پوستی و گوارشی

جدول ۱۲-۴) ماتریس ریسک با توجّه به ضرایب خطر و مواجهه

ضریب خطر		ناچیز	۱	۲	۳	۴
	۴	کم	متوسط	متوسط	زیاد	خیلی زیاد
	۳	کم	متوسط	متوسط	زیاد	زیاد
	۲	کم	متوسط	متوسط	متوسط	متوسط
	۱	کم	کم	متوسط	متوسط	متوسط
	ناچیز	ناچیز	کم	کم	کم	کم
		ضریب مواجهه				

۴-۱-۴-۹) گام نهم: تفسیر ریسک مواجهه شغلی کارکنان در گروه‌های SEG مختلف و توصیه‌های لازم برای اقدامات کنترلی

در این مرحله، با توجّه به تشخیص میزان ریسک از ماتریس فوق و عملکرد سیستم‌های کنترلی برای مواجهه با ترکیبات شیمیایی، مطابق با مراحل زیر اقدام می‌شود:

۴-۱-۴-۹-۱) سطح ریسک قابل قبول

رتبه ریسک در سطح قابل قبول به مفهوم میزان ریسک ناچیز و کم می‌باشد که به ترتیب با رنگ سبز روشن و رنگ سبز پررنگ در جدول برآورد رتبه ریسک نمایش داده شده است (جدول ۱۲-۴). در این سطح از ریسک، وضعیت سیستم‌های کنترلی برای مواجهه کارکنان قابل قبول در نظر گرفته می‌شوند. به‌طور کلی می‌توان گفت که در این سطح از ریسک، مواجهه کارکنان با مواد شیمیایی در فرآیندهای صنعتی و خدماتی کمتر از حد مجاز استاندارد تماس شغلی است و در صورت انجام مراتب ارزیابی ریسک کیفی به‌طور صحیح، ارزشیابی مواجهه شغلی (کاربرد روش‌های استاندارد برای نمونه‌برداری و آنالیز) در صورت عدم تغییر وضعیت در فرآیند انجام کار، مورد نیاز نمی‌باشد.

اقدامات در مراتب بعدی: ارزیابی ریسک کیفی به‌صورت ادواری سالیانه توصیه می‌شود. همچنین، در صورت تغییر در فرایند صنعتی در طول زمان یا استفاده از مواد شیمیایی جدید، یا تغییر در به‌کارگیری مواد شیمیایی، ارزیابی ریسک کیفی می‌بایست سریعاً انجام شود.

۴-۱-۴-۹-۲) سطح ریسک متوسط یا وضعیت نامعلوم

سطح ریسک کیفی "متوسط" بیانگر پتانسیل مواجهه به میزان نامشخص است که با رنگ زرد در جدول ۴-۱۲ نشان داده شده است. در این سطح از ریسک، احتمال وجود مواجهه بیشتر از حدود مجاز تماس شغلی وجود دارد.

اقدامات در مراتب بعدی: برای این دسته از کارکنان، شروع اقدامات کنترلی فوری و سپس ارزیابی مجدد ریسک کیفی تا حصول اطمینان از کاهش سطح ریسک به سطح قابل قبول ضروری است. در صورت کاهش سطح ریسک به حد قابل قبول (ریسک کم)، ارزیابی ریسک کیفی به‌صورت ادواری سالیانه یا در فواصل زمانی کمتر، مطابق با نظر کارشناسان، لازم خواهد بود. در صورت عدم کاهش سطح ریسک، ارزشیابی مواجهه شغلی با استفاده از روش‌های استاندارد نمونه‌برداری، آنالیز و مقایسه با حدود مجاز مواجهه شغلی ضروری است.

۴-۱-۴-۹-۳) ریسک زیاد یا خیلی زیاد

سطح ریسک کیفی در حد "زیاد" یا "خیلی زیاد"، نشان‌دهنده احتمال مواجهه شغلی گروه SEG در سطحی فراتر از حدود استاندارد تماس شغلی است و به هیچ‌وجه قابل قبول نمی‌باشد.

اقدامات در مراتب بعدی: در چنین شرایطی، اصلاح و تغییر فوری در فرآیندهای تولید ضروری است که برای این منظور می‌توان از راهکارهای زیر استفاده نمود:

- **جایگزینی محصولات شیمیایی خطرناک با مواد شیمیایی دارای سمیت کمتر**
- **جایگزینی محصولات شیمیایی آلی با مواد دارای فشار بخار کمتر**
- **طراحی و نصب سیستم‌های تهویه صنعتی**
- **ارزیابی ریسک کیفی بعد از انجام اقدامات کنترلی**
- **در صورت کاهش رتبه ریسک گروه SEG به حد قابل قبول، ارزیابی ریسک کیفی هر شش ماه یکبار الزامی است.**

- **در صورت عدم کاهش سطح ریسک، ارزشیابی مواجهه شغلی از طریق نمونه‌برداری و آنالیز با روش‌های استاندارد و مقایسه با استاندارد حد تماس شغلی الزامی است.**
- **در صورت وجود ریسک در این مرحله، اقدامات کنترلی می‌بایست با کارشناسان مجرب تا حصول اطمینان از کاهش رتبه ریسک به حد قابل قبول، تجدید نظر گردد.**

۴-۱-۴-۱۰) گام دهم: ثبت نتایج و برنامه‌ریزی برای انجام ارزیابی و یا ارزشیابی‌های ریسک در آینده

اگرچه ارزیابی ریسک کیفی در برخی از موارد می‌تواند وضعیت مواجهه کارکنان در گروه‌های SEG را مشخص نماید، ولی در برخی از موارد، در صورت عدم رعایت مراتب این روش، نتایج ممکن است گمراه‌کننده باشد و میزان ریسک را بیشتر یا کمتر از میزان واقعی نشان دهد. از این رو، توصیه می‌شود مراتب ارزیابی ریسک کیفی به‌طور صحیح و طبق روش گفته شده انجام شود و از کارشناسان با تجربه در این زمینه کمک گرفته شود.

به‌طور کلی، اگر کارگروه ارزیابی‌کننده ریسک از میان مسئولان سازمان انتخاب شوند و نقش مهندس بهداشت حرفه‌ای در جلسات فقط به‌عنوان تأمین‌کننده اطلاعات برای کارشناسان صنعت در نظر گرفته شود، نتایج ارزیابی ریسک کیفی اشکالات کمتری خواهد داشت. ضمن اینکه تصمیمات اتخاذ شده در گروه، با توجّه به مسئولین سازمان، ضمانت اجرایی بیشتری پیدا خواهد کرد.

در خاتمه باید مجدداً متذکر شد که روش ارزیابی ریسک کیفی نمی‌تواند در تمامی موارد جایگزین ارزشیابی مواجهه شغلی کارکنان شود و گروه ارزیابی‌کننده ریسک می‌تواند با اطلاع کامل از مواضع کاری، برنامه ارزشیابی مواجهه شغلی را تأیید و به مرحله اجرا بگذارد.

۴-۲) مثال‌های عینی از ارزیابی ریسک کیفی مواجهه شغلی کارکنان با ترکیبات شیمیایی

۴-۲-۱) مثال شماره-۱: ارزیابی ریسک جوشکاران کارخانه ساخت سازه‌های ساختمانی

این مثال در دو سطح ارزیابی مواجهه شغلی کارکنان (QEA) و ارزیابی ریسک کیفی (QRA) مورد بررسی قرار خواهد گرفت.



شکل ۵-۴) تصویری از کارخانه ساخت قطعات آهنی و سازه‌های ساختمانی

گام اول: شناسایی محیط کارگاه

۱-۱) **فرایند کاری:** در کارخانه ساخت سازه‌های ساختمانی، قطعات فلزی بزرگ از صفحات آهنی برش داده می‌شوند و پس از جوشکاری برقی یا الکترودی، به‌صورت قطعات ساخته‌شده و رنگ‌آمیزی‌شده تحویل سفارش‌دهندگان می‌گردند.

۱-۲) **شرح وضعیت شغلی گروه SEG جوشکاران:** جوشکاران در این سازمان به‌صورت تمام‌وقت قطعات آهنی سازه‌های ساختمانی را تولید می‌کنند.

۳-۱) **وسایل حفاظت فردی:** فقط کفش‌های ایمنی و لباس کار در اختیار کارکنان گذاشته می‌شود.

نظر متخصص بهداشت حرفه‌ای

بر اساس مشاهدات کارشناس مهندسی بهداشت حرفه‌ای، مراتب به شرح زیر گزارش شد:

۴-۱) استفاده از وسایل حفاظت فردی توسط کارکنان مشاهده نشد و لباس کار آنها نیز آلوده بود.

۵-۱) نوع مواد شیمیایی مصرفی، مقدار و نحوه کاربرد آن در فرآیند شغلی کارکنان به‌صورت الکترودهای جوشکاری با اندازه‌های مختلف گزارش شد.

۶-۱) آلاینده‌های شیمیایی مهم در طول فرایند صنعتی: فیوم جوشکاری (اکسید آهن) و گازهای Nitric Oxide, Nitrogen Dioxide, Carbon Monoxide, Ozone, Phosgene, Hydrogen Fluoride, Carbon Dioxide.

۷-۱) از سوابق آلاینده‌سنجی، گزارش بیماری‌های شغلی و شکایات کارکنان در مورد مسائل سلامتی، اطلاعاتی در دسترس نبود.

گام دوم: گردآوری اطلاعات از محیط کار جوشکاران و درج در فرم‌های ۱ و ۲

فرم شماره-۱: مشخصات گروه شغلی جوشکاران		
۱- واحد شغلی **جوشکاران قوس الکتریکی**	۲- تاریخ بررسی	ملاحظات **سیستم مدیریتی کارخانه بسیار محدود و کمبود حضور کارشناس صنعتی برای نظارت مسائل HSE مشهود بود.**
۳- محل انجام کار **کارخانه ساخت قطعات سازه‌های ساختمانی**	۴- تعداد کارگران **۱۰۰ نفر**	
۵- ساعات کاری کارگران **۶ روز هفته و روزی ۱۲ ساعت**	۶- نوع شیفت کاری **عادی**	
۷- نظر کارگران در مورد سلامت خود: **اطلاعاتی در دسترس نبود**	۸- امکان تماس شغلی غیر عادی برای کارکنان: **اطلاعاتی در دسترس نبود**	
۹- گزارش در مورد سلامت کارکنان: **اطلاعاتی در دسترس نبود**	۱۰- امکان مواجهه کارکنان با چند ترکیب به‌طور همزمان: **دمه فلزات و گازهای حاصل از جوشکاری**	
۱۱- با توجّه به سوابق پزشکی اعضای گروه SEG، آیا کارکنانی به‌عنوان افراد آسیب‌پذیر معرفی شده‌اند؟ **هیچ گزارشی مستند از سلامت کارکنان ارائه نشده بود**	۱۲- امکان دریافت ترکیبات شیمیایی از طریق جذب پوستی یا گوارشی: **اطلاعات مستند ارائه نگردید**	
سایر اطلاعات: **برای مثال " بررسی ارتباط میان مواجهه‌های شغلی و بیماری‌های کارکنان "**		

فرم شماره- ۲: مشخصات مواد شیمیایی مورد استفاده یا تولید شده در فرایندهای شغلی					
مشخصات گروه SEG	**نام ترکیب شیمیایی**	**کد GHS و تعیین رتبه خطر (HR)**	**اثرات سمی ترکیب در برگه SDS**	**TLV و اساس محاسبه استاندارد حد تماس شغلی بر پایه اثرات بالقوه در اندام یا اندام‌های هدف**	**ملاحظات**
جوشکاران فلز آهن	دمه اکسید آهن (Fe_2O_3)	اثرات برگشت‌پذیر H332 HR=1	----	پنوموکونیوزیس برگشت‌پذیر TLV-TWA= 5 mg/m^3	کد GHS با توجّه به اثرات بالقوه
	دی‌اکسید نیتروژن (NO_2)	SYMBOL: O, T+; R: 26-34 H331 HR=2	-----	تحریک‌کننده مجاری تحتانی تنفسی TLV-TWA=0.2 ppm	کد GHS با توجّه به کد R
	اُزُن (O_3)	H-330, H-372 HR=3	آسیب به سیستم تنفسی در مواجهه مزمن	Ozone کار سنگین TLV-TWA=0.05 ppm کار متوسط TLV-TWA=0.08 ppm کار سبک TLV-TWA=0.10 ppm بار کاری سبک، متوسط و سنگین در کمتر از ۲ ساعت TLV-TWA= 0.20 ppm	کد GHS دارد
	هیدروژن فلوراید (HF)	H300+H310+H330 تماس مکرر در حد OEL HR=3	آسیب به سیستم تنفسی فوقانی، چشم، پوست و دندان	TLV-TWA= 0.5 ppm TLV-C=2 ppm تحریک کننده مجاری تحتانی و فوقانی تنفسی، چشم و پوست فلوئوروزیس	

گام سوم- بررسی سیستم‌های کنترل‌کننده ترکیبات شیمیایی

شماره / نام فرایند	تعداد نفرات	نام ترکیب شیمیایی موجود	کنترل مدیریتی	سیستم‌های کنترلی فنی مهندسی	ملاحظات
جوشکاران قطعات آهن	۱۰۰	دمه اکسید آهن و گازهای اکسید ازت و اُزُن	نظم در فرایندها و مسائل بهداشت و ایمنی مشاهده نگردید	تهویه عمومی که در فصل زمستان خاموش است	کارخانه بسیار بی‌نظم اداره می‌شود

گام چهارم: ارزیابی ریسک کیفی گروه SEG جوشکاران

با توجّه به اطلاعات گرفته شده از صنعت و مندرج در فرم‌های اطلاعاتی شماره ۱ و شماره ۲ از وضعیت مواجهه جوشکاران قطعات آهنی، مراتب ارزیابی کیفی ۲ با اطلاعاتی به‌شرح زیر انجام می‌شود:

۴-۱) **تعداد افراد در معرض مواجهه:** تعداد ۱۰۰ کارگر به‌صورت تمام وقت به فرایند جوشکاری مشغول هستند.

۴-۲) **سیستم‌های کنترل کننده هوای محیط کار جوشکاران:** محیط کار مجهز به تهویه صنعتی به‌صورت موضعی نبود و تنها چند هواکش خاموش در دیوارهای کارخانه مشاهده شد.

۴-۳) **کنترل مدیریتی:** ساختار کنترل مدیریتی کارخانه به نظر مناسب نبود.

۴-۴) **وسایل حفاظت فردی:** جوشکاران از وسایل حفاظت فردی ابتدایی شامل لباس و کفش کار استفاده می‌کردند.

۴-۵) **تنوع مواد شیمیایی در محیط کار:** در گروه SEG جوشکاران، غیر از استفاده از الکترود جوشکاری، ترکیب شیمیایی دیگری مشاهده نشد.

۴-۶) **تخمین ضرایب مواجهه و خطر:** از اطلاعات قبلی ثبت شده در کارخانه ساخت قطعات آهنی، به‌شرح زیر می‌توان این ضرایب را استخراج نمود:

مواجهه شغلی جوشکاران قطعات فلز آهنی، بر اساس گزارشات علمی، عمدتاً با اکسید آهن Fe_2O_3، گاز ازن و گاز دی‌اکسید ازت می‌باشد.

۴-۶-۱) تعیین ضریب مواجهه جوشکاران:

۴-۶-۱-۱) ضریب مواجهه جوشکاران با دمه اکسید آهن، با توجّه به مواجهه معمول جوشکاران در پروژه‌های قبلی صورت‌گرفته در صنایع کشور ایران، در دامنه ۱ تا ۱۰ میلی‌گرم بر متر مکعب قرار دارد و دارای رتبه ۴ است.

۴-۶-۱-۲) ضریب مواجهه جوشکاران با گاز اُزُن، بر اساس پارامترهای تعداد دفعات و مدت زمان مواجهه، مشخصات شیمیایی و کیفیت سیستم‌های کنترلی، در رتبه ۴ تخمین زده شد.

۴-۶-۱-۳) ضریب مواجهه جوشکاران با دی‌اکسید ازت، بر اساس پارامترهای تعداد دفعات و مدت زمان مواجهه، مشخصات شیمیایی و کیفیت سیستم‌های کنترلی، در رتبه ۴ تخمین زده شد.

۴-۶-۲) تعیین ضریب خطر برای جوشکاران:

۴-۶-۲-۱) ضریب خطر با توجّه به اثرات بالقوه دمه اکسید آهن و کد GHS دارای رتبه ۱ تشخیص داده می‌شود (فرم اطلاعاتی شماره-۲).

۴-۶-۲-۲) ضریب خطر برای گاز اُزُن، با توجّه به اثرات بالقوه آن بر سلامت و کد GHS دارای رتبه ۳ تشخیص داده می‌شود (فرم اطلاعاتی شماره-۲).

۴-۶-۲-۳) ضریب خطر برای گاز دی‌اکسید ازت، با توجّه به اثرات بالقوه آن بر سلامت و کد GHS، دارای رتبه ۲ تشخیص داده می‌شود (فرم اطلاعاتی شماره-۲).

گام پنجم: نتیجه ارزیابی ریسک کیفی شماره-۲ برای گروه SEG جوشکاران

۱- **ارزیابی ریسک کیفی جوشکاران در مواجهه با دمه اکسید آهن در میزان متوسط دیده شد.**

۲- ارزیابی ریسک کیفی جوشکاران در مواجهه با دمه گاز ازُن، در میزان زیاد دیده شد.
۳- ارزیابی ریسک کیفی جوشکاران در مواجهه با دی‌اکسید ازت، در میزان زیاد دیده شد..

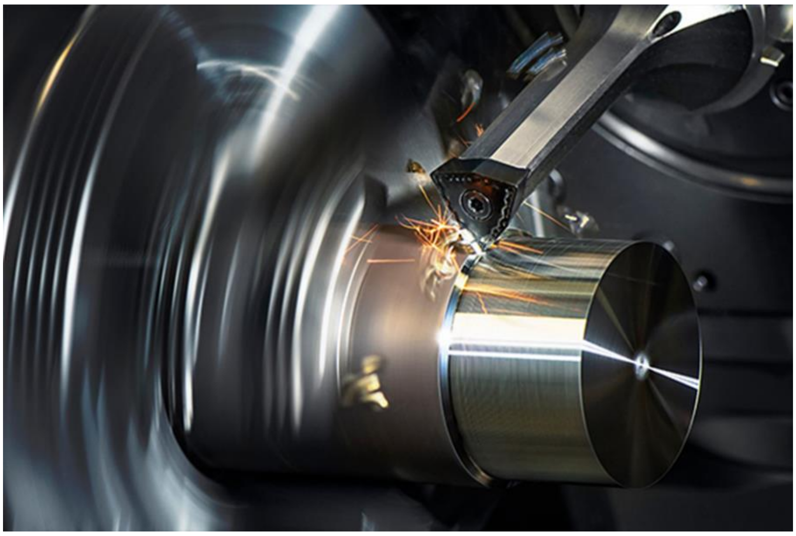
توصیه و اقدامات لازم برای ارتقای سلامت جوشکاران

- برای این دسته از کارکنان، شروع اقدامات کنترلی و ارزیابی ریسک کیفی مجدد تا اطمینان از کاهش سطح ریسک به حدود قابل قبول ضروری است.
- در صورت کاهش سطح ریسک به حد قابل قبول، انجام ارزیابی ریسک کیفی به‌صورت ادواری توصیه می‌شود.
- در صورت عدم کاهش سطح ریسک به حد قابل قبول، ارزشیابی مواجهه شغلی با استفاده از روش‌های استاندارد نمونه‌برداری، آنالیز و مقایسه با استانداردهای تماس شغلی ضروری است.

تشخیص ریسک گروه کارکنان ساخت سازه های ساختمان

گروه SEG	نام ترکیب شیمیایی	HR	ER	ریسک	ملاحظات
جوشکاران قطعات آهنی	دمه اکسید آهن (Fe_2O_3)	۱	۴	۴	ریسک متوسط
	دی‌اکسید ازت (NO_2)	۲	۴	۸	ریسک متوسط
	ازُن (O_3)	۳	۴	۱۲	ریسک زیاد
	هیدروژن فلوراید (HF)	۳	۴	۱۲	ریسک زیاد

۴-۲-۲) مثال شماره-۲: ارزیابی ریسک کیفی کارکنان تراشکار دستگاه CNC برای تولید قطعات موتور



گام اول: شناسایی محیط کارگاه

۱-۱) **فرایند کاری:** اکثراً قطعات موتور و گیربکس در کارخانه‌های تراشکاری و به‌صورت غوطه‌ور در روغن ساخته می‌شوند. لازم به‌ذکر است که مقدارTLV-TWA برای میست روغن تراشکاری به‌صورت تمیز و تصفیه شده در میزان ۵ mg/m^3 از طرف سازمان ACGIH اعلام شده است. از سوی دیگر، روغن در برخی از فرآیندهای تراشکاری به دلیل عدم تصفیه صحیح، سیاه یا تیره رنگ می‌شود. روغن سیاه تصفیه‌نشده به‌عنوان ترکیب سرطان‌زای A1 (سرطان‌زای تأییدشده انسانی) شناخته می‌شود و حد آستانه تماس شغلی برای کارکنان درگیر در فرآیندهای کار با روغن‌های تصفیه‌نشده، با نماد L به مفهوم مواجهه در کمترین میزان ممکن، ارائه شده است.

۱-۲) **شرح وضعیت شغلی گروه SEG تراشکاران CNC:** تراشکاران در این سازمان در شش روز هفته و روزانه ۱۲ ساعت به تولید قطعات موتور و گیربکس مشغول بودند. روغن‌های روانکاری در دستگاه تراش استفاده می‌شد و تراکم این روغن در اطراف دستگاه‌ها مشهود بود.

۱-۳) **وسایل حفاظت فردی:** فقط کفش‌های ایمنی و لباس کار در اختیار کارکنان گذاشته می‌شود.

نظر متخصص بهداشت حرفه‌ای

بر اساس مشاهدات کارشناس مهندسی بهداشت حرفه‌ای، مراتب به‌شرح زیر گزارش گردید:

۱-۴) کارکنان در تماس با میست مایعات روانکاری هستند و علاوه بر آن، لباس کار آنها آغشته به روغن است. همچنین تعدادی از کارگران دارای اگزمای پوستی بودند.

۱-۵) استفاده از وسایل حفاظت فردی توسط کارکنان مشاهده نشد و لباس کار آنها نیز تمیز نبود.

۱-۶) آلاینده‌های شیمیایی مهم در طول فرایند صنعتی: میست روغن معدنی تصفیه نشده، بر اساس اطلاعات ارائه شده در سایت زیر، حاوی ترکیبات فرمالدئید و نیتروزآمین است:

https://www.ccohs.ca/oshanswers/chemicals/metalworking_fluids.pdf

۱-۷) سوابق آلاینده‌سنجی و گزارش بیماری‌های شغلی و شکواییه کارکنان در مورد مسائل سلامتی: سوابق آلاینده‌سنجی در دسترس نبود، ولی کارکنان از ناراحتی‌های پوستی و تنفسی شکایت داشتند و یک نفر از بیماری خودایمنی گزارش داده بود.

۱-۸) نوع مواجهه شغلی کارکنان تراشکاری: روغن مورد استفاده از نوع تصفیه شده (تمیز) نبوده و میست آن حاوی فرمالدئید و نیتروزآمین است.

گام دوم: گردآوری اطلاعات از محیط کار جوشکاران و درج در فرم‌های ۱ و ۲

فرم شماره-۱: مشخصات گروه شغلی جوشکاران		
۱- واحد شغلی **تراشکاران CNC**	۲- تاریخ بررسی	ملاحظات **سیستم مدیریتی بسیار نامناسب و بدون نظم و ترتیب در مسائل حفاظتی و بهداشتی بود**
۳- محل انجام کار **کارخانه ساخت قطعات موتور و گیربکس**	۴- تعداد کارگران **۲۰۰ نفر**	
۵- ساعات کاری کارگران **۶ روز هفته و روزی ۱۲ ساعت**	۶- نوع شیفت کاری **عادی**	
۷- نظر کارگران در مورد سلامت خود: **اطلاعاتی در دسترس نبود**	۸- امکان تماس شغلی غیر عادی برای کارکنان: **اطلاعاتی در دسترس نبود**	
۹- گزارش در مورد سلامت کارکنان: **بر اساس شکواییه کارگران مشکلات پوستی گزارش گردید**	۱۰-امکان مواجهه کارکنان با چند ترکیب به‌طور همزمان: **میست روغن تصفیه نشده**	
۱۱- با توجّه به سوابق پزشکی اعضای گروه SEG، آیا کارکنانی به‌عنوان افراد آسیب‌پذیر معرفی شده‌اند؟ **هیچ گزارشی مستند از سلامت کارکنان ارائه نشده بود**	۱۲- امکان دریافت ترکیبات شیمیایی از طریق جذب پوستی یا گوارشی: **اطلاعات مستند ارائه نگردید ولی با توجّه به لباس‌های آلوده کارگران امکان جذب پوستی وجود دارد**	
سایر اطلاعات: **یک مورد بیماری خود ایمنی از طرف یکی از پرسنل گزارش گردید**		

فرم شماره- ۲: مشخصات مواد شیمیایی مورد استفاده یا تولید شده در فرایندهای شغلی					
مشخصات گروه SEG	**نام ترکیب شیمیایی**	**کد GHS و تعیین رتبه خطر (HR)**	**اثرات سمی ترکیب در برگه SDS**	**TLV و اساس محاسبه استاندارد حد تماس شغلی بر پایه اثرات بالقوه در اندام یا اندام‌های هدف**	**ملاحظات**
تراشکاران CNC	روغن معدنی تصفیه نشده (حاوی فرمالدئید و نیتروزآمین)	ترکیب سرطان‌زا H350 HR=4	----	Mineral oil, TLV Basis-URT irritation Pure, highly = 5 mg/m^3 Poorly and mildly refined= (L) Carcinogenic A2	کد GHS بر اساس اثر سرطان‌زایی تأئید شده انسانی میست مایعات روانکاری از طرف سازمان IARC استنتاج گردیده است.

گام سوم- بررسی سیستم‌های کنترل‌کننده ترکیبات شیمیایی

شماره / نام فرایند	تعداد نفرات	نام ترکیب شیمیایی موجود	کنترل مدیریتی	سیستم‌های کنترلی فنی مهندسی	ملاحظات
تراشکاران CNC	۲۰۰	میست روغن‌های روانکاری تصفیه نشده	نظم در فرایندها و مسائل بهداشت و ایمنی مشاهده نشد.	سیستم تهویه صنعتی از نوع تهویه موضعی مکشی[1]	کنترل مدیریتی ملموسی در کارگاه دیده نشد و کارگاه بسیار کثیف و سقف سوله پر از برفک قارچ بود.

[1] Local Exhaust Ventilation

گام چهارم: ارزیابی ریسک کیفی گروه SEG تراشکاران CNC

با توجّه به اطلاعات گرفته شده از صنعت و مندرج در فرم‌های اطلاعاتی شماره ۱ و شماره ۲ از وضعیت مواجهه تراشکاران CNC، مراتب ارزیابی کیفی -۲ با اطلاعاتی به شرح زیر انجام می‌شود:

۴-۱) **تعداد افراد در معرض مواجهه:** تعداد ۱۰۰ کارگر به‌صورت تمام وقت به فرایند تراشکاری مشغول هستند.

۴-۲) **سیستم‌های کنترل کننده هوای محیط کار جوشکاران:** سیستم تهویه صنعتی از نوع تهویه موضعی مکشی مشاهده شد.

۴-۳) **کنترل مدیریتی:** ساختار کنترل مدیریتی کارخانه به نظر مناسب نبود.

۴-۴) **وسایل حفاظت فردی:** تراشکاران از وسایل حفاظت فردی بسیار ابتدایی شامل لباس و کفش کار استفاده می‌کردند.

۴-۵) **تنوع مواد شیمیایی در محیط کار:** در گروه SEG، تراشکاران از روغن‌های روانکاری تصفیه‌نشده استفاده می‌کردند.

۴-۶) **تخمین ضرایب مواجهه و خطر:** از اطلاعات قبلی ثبت شده در کارخانه تولید قطعات موتور، به‌شرح زیر می‌توان این ضرایب را استخراج نمود:

اصلی‌ترین مواجهه شغلی تراشکاران بر اساس گزارشات علمی با میست روغن است که بسته به کیفیت روغن مصرفی در فرآیند تراشکاری (استفاده از روغن کثیف و تصفیه‌نشده) میست آن به‌عنوان عامل سرطان‌زای انسانی از طرف سازمان IARC طبقه‌بندی شده است. از آنجایی که برگه SDS فقط برای روغن تمیز روانکاری دستگاه تراش در دسترس بود، کد GHS برای روغن تصفیه‌نشده و سیاه بر اساس اثرات بالقوه آن تعیین گردید.

۴-۶-۱) تعیین ضریب مواجهه جوشکاران:

۴-۶-۱-۱) ضریب مواجهه جوشکاران با دمه اکسید آهن، با توجّه به مواجهه معمول جوشکاران در پروژه‌های قبلی صورت‌گرفته در صنایع کشور ایران و در دامنه ۱ تا ۱۰ میلی‌گرم بر متر مکعب، دارای رتبه ۴ است. ضریب مواجهه با توجّه به تراکم میست روغن در هوا و مطالعات قبلی در کارگاه‌های تراشکاری CNC دارای

سیستم‌های تهویه صنعتی در حدود $3\ mg/m^3$ برآورد گردیده است. با توجّه به فقدان سیستم‌های تهویه صنعتی در کارگاه‌های مورد بازدید، ضریب مواجهه به‌احتمال‌زیاد معادل ردیف سوم مندرج در جدول ۱۰-۴ می‌باشد و ضریب پراکندگی روغن در هوا معادل ۳ در نظر گرفته می‌شود.

۲-۱-۶-۴) ضریب سیستم‌های کنترلی (سیستم تهویه صنعتی، مدیریت کنترل و کاربرد وسایل حفاظت فردی) با توجّه به فقدان سیستم‌های کنترلی، معادل ۴ در نظر گرفته می‌شود.

۳-۱-۶-۴) ضریب مدت زمان و تعداد دفعات مواجهه با توجّه به شش روز کار هفتگی و دوازده ساعت کار روزانه، معادل ۵ در نظر گرفته می‌شود.

۴-۱-۶-۴) با توجّه به پارامترهای ضریب تراکم آئروسل در هوا (۳)، سیستم کنترلی (۴) و مدت زمان و تعداد دفعات مواجهه (۵) و نیز جدول ۱۲-۴، رتبه نهایی مواجهه در حدود ۴ برآورد گردید.

۳-۶-۴) تعیین ضریب خطر برای تراشکاران CNC:

با توجّه به اثرات بالقوه میست روغن معدنی تصفیه‌نشده، کد GHS معادل H350 استخراج گردید که مربوط به اثرات بالقوه ترکیب در ایجاد سرطان‌زایی انسانی می‌باشد. ضریب خطر برای کد H350 در حدود ۴ برآورد می‌گردد.

گام پنجم: نتیجه ارزیابی ریسک کیفی شماره-۲ برای گروه SEG جوشکاران

عدد ریسک تراشکاران CNC در میزان ۱۶ محاسبه شد که نشان‌دهنده ریسک بسیار زیاد است.

توصیه و اقدامات لازم برای ارتقای سلامت جوشکاران

- **• رتبه‌بندی ریسک کیفی در حد «زیاد» یا «خیلی زیاد»، نشان‌دهنده احتمال مواجهه شغلی گروه SEG فراتر از سطح استاندارد تماس شغلی است که به هیچ‌عنوان قابل‌قبول نیست.**
- **جایگزینی محصولات شیمیایی خطرناک با مواد شیمیایی دارای سمیت کمتر**
- **جایگزینی محصولات شیمیایی آلی با مواد دارای فشار بخار کمتر**

- طراحی و نصب سیستم‌های تهویه صنعتی
- پایش بیولوژیکی و سلامت تراشکاران
- الزام به ارزشیابی مواجهه شغلی از طریق نمونه‌برداری و آنالیز به روش‌های استاندارد و مقایسه با حدود استاندارد تماس شغلی
- در صورت کاهش رتبه ریسک گروه SEG به حد قابل قبول، ارزیابی ریسک کیفی ادواری به‌صورت هر شش ماه یکبار
- در صورت عدم کاهش ریسک، تجدید نظر در اقدامات انجام شده تا حصول اطمینان از وضعیت شغلی کارکنان تا حد ایمن

بخش ضمائم

ضمیمه شماره-۱

معادل عبارات ریسک (Risk Phrase) در سیستم GHS

عبارات ریسک	معادل کد
R28	H300
R25	H301
R65	H304
R27	H310
R24	H311
R23; R26	H330
R23	H331
R46	H340
R68	H341
R45	H350
R49	H350
R40	H351
R60	H360F
R61	H360D
R60-61	H360Fd
R60-63	H360Df
R61-62	H361f
R62	H361d
R63	H361fd
R64	H362
R39/23;R39/24; R39/25; R39/26; R39/27;	H370
R39/28	H371
R68/20; R68/21; R68/22	H372
R48/25; R48/24 R48/23	H373
R48/20; R48/21; R48/22	H410
R50	H411
R50-53	H412
R51-53	H413
R52-53	EUH059
R53	EUH029
R59	EUH031
R29	EUH032
R39-41	EUH070
R42	H334
R43	H317

	**Exploding bomb** (for explosion or reactivity hazards)		**Flame** (for fire hazards)		**Flame over circle** (for oxidizing hazards)
	**Gas cylinder** (for gases under pressure)		**Corrosion** (for corrosive damage to metals, as well as skin, eyes)		**Skull and Crossbones** (can cause death or toxicity with short exposure to small amounts)
	**Health hazard** (may cause or suspected of causing serious health effects)		**Exclamation mark** (may cause less serious health effects or damage the ozone layer*)		**Environment*** (may cause damage to the aquatic environment)
	**Biohazardous Infectious Materials** (for organisms or toxins that can cause diseases in people or animals)				

* The GHS system also defines an Environmental hazards group. This group (and its classes) was not adopted in WHMIS 2015. However, you may see the environmental classes listed on labels and Safety Data Sheets (SDSs). Including information about environmental hazards is allowed by WHMIS 2015.

ضمیمه شماره-۲

چک لیست کنترل مدیریتی استخراج شده از سایت دانشگاه آلبرتا کشور کانادا

Error! Hyperlink reference not valid.https://www.ualberta.ca/human-resources-health-safety-environment/environment-and-safety/hazard-management/how-can-i-control-them/administrative-controls/index.html

کنترل مدیریتی بر مبنای دستورالعمل‌های مدیریتی برای تضمین انجام مراحل کار با کمترین مخاطرات شغلی است. کنترل مدیریتی جدا از اقدامات فنی مهندسی یا کاربرد وسایل حفاظت فردی است و به‌صورت کاربرد برنامه بهینه‌شده آموزش فنی و حرفه‌ای، آموزش‌های عادی، بهبود روش‌های انجام وظایف و دستورالعمل‌های شغلی می‌باشد.

رئوس سیستم کنترل مدیریتی بر مبنای چند اصل به‌شرح زیر است:

نحوه انجام ایمن:

۱- نحوه انجام وظایف به‌طور ایمن
۲- دستورالعمل‌های انجام وظایف به‌صورت فردی
۳- قوانین انجام وظایف
٤- برنامه‌ریزی برای شیفت‌های کاری
٥- آموزش‌های فنی‌حرفه‌ای ضمن کار
٦- آمادگی برای شرایط فوریتی
۷- علائم ایمنی، هشدار دهنده و برگه‌های ایمنی شیمیایی
۸- اقدامات پیشگیرانه (واکسیناسیون و سیستم‌های هشدار دهنده)
۹- خانه‌داری و نظافت صحیح کارگاه‌های صنعتی و حفظ و نگهداری سیستم‌های محیط کار

پرسشنامه مدیریت کنترلی

تاریخ بازدید:			**نتایج بازرسی**
(✓) رضایت بخش (✗) نیازمند به اقدامات اصلاحی است			
نظر کارشناسی	وضعیت محل	موقعیت جغرافیایی	
			تابلوی اعلانات و علایم
			تابلوهای اعلانات و علائم
			آیا آنها تمیز و خوانا هستند؟
			آیا مواد جدید در تابلوها ذکر شده است؟
			آیا تابلوها در تردد پرسنل دخالت می‌کنند؟
			کف سالن‌های کارخانه
			کف سالن‌ها
			آیا مواد زائد و پسماندهای فرایندها در کف سالن‌های کارگاه دیده می‌شود؟
			آیا کف‌ها لغزنده، روغنی یا مرطوب هستند؟
			راهروها و مسیرهای تردد
			راه‌پله‌ها و راهروها
			آیا آنها پاک و برای رفت و آمد درست نگهداری می‌شوند؟
			آیا راه‌پله‌ها به خوبی روشن می‌شوند؟
			آیا نرده‌ها، دستگیره‌ها سر جای خود هستند؟
			آیا راهروها مشخص و قابل مشاهده هستند؟
			تجهیزات
			تجهیزات
			آیا حفاظ‌ها، صفحه‌نمایش‌ها و دستگاه‌های میرا کننده صدا در جای خود قرار دارند و مؤثر هستند؟
			آیا ابزارها به خوبی تعمیر شده و استفاده از آن ایمن است؟

صندلی‌ها ضعیف هستند			
لبه‌های تیز روی میز و کابینت وجود دارد			
آرگونومی ضعیف (ارتفاع صفحه کلید، تنظیم صندلی، ارتفاع میز)			
شلوغی			
آیا نردبان‌ها به خوبی نگهداری می‌شوند و استفاده از آنها بی‌خطر است؟			
تجهیزات اقدامات اضطراری			
تجهیزات اضطراری			
آیا تمام تجهیزات کنترل آتش به‌طور مرتب آزمایش و تأیید شده است؟			
آیا تجهیزات کنترل آتش برای نوع آتشی که باید کنترل کند، مناسب هستند؟			
آیا روشنایی اضطراری در محل قرار دارد و به‌طور مرتب آزمایش می‌شود؟			
ساختمان			
آیا ساختمان‌ها از نظر کاربری، اشغال، خدمات ساختمان و تأسیسات لوله‌کشی مطابق با استانداردها هستند؟			
سازه‌های زیر را برای اطمینان از ایمنی بررسی کنید:			
- درهای نوسانی			
- دهانه‌های کف و دیوار			
- نردبان، راه‌پله و رمپ			
- نرده‌های محافظ			
آیا مواد به‌طور ایمن ذخیره می‌شوند؟			
سیستم جابه‌جایی هوا داخل کارخانه			
آیا نرخ تبادل هوا، الزامات استاندارد را برآورده می‌کند؟			
آیا سیستم عاری از منابع آلودگی (مانند آزبست، میکروارگانیسم‌ها، گرد و غبار، دود) است؟			
آیا رطوبت در محدوده توصیه شده است؟			
محصولات و ترکیبات خطرناک			
آیا محصولات خطرناکی وجود دارد به‌عنوان مثال، محصولات تحت نظارت سازمان اطلاعاتی مخاطرات محیط کار؟			

(Workplace Hazardous Materials Information System)			
- اگر بله، آیا محصولات به درستی برچسب‌گذاری شده‌اند؟			
- اگر بله، آیا برگه اطلاعات ایمنی مربوطه (SDS) برای هر محصول وجود دارد؟			
-اگر بله، آیا کارگران در مورد نحوه کار با این محصولات یا نزدیکی ایمن آنها آموزش دیده‌اند؟			
تسهیلات بهداشتی			
سرویس بهداشتی			
آیا دستشویی‌ها و محل‌های آماده‌سازی غذا تمیز هستند؟			
آیا موارد زیر به اندازه کافی تأمین شده است؟			
- توالت			
- دوش			
- آب آشامیدنی (قابل شرب)			
- ذخیره‌سازی لباس			
- تعویض اتاق			
- اقامتگاه‌های صحرایی			
- اتاق‌های نهار			
آیا تدابیری برای جلوگیری از شیوع بیماری وجود دارد؟			
حراست و امنیت محل کار			
موارد امنیتی			
آیا رویه‌های ورود و خروج، امنیت شخصی کارگران را در شب تأمین می‌کند؟			
آیا رویه‌های اضطراری (تخلیه، آتش‌سوزی، تهدید بمب، فرد متخاصم) وجود دارد؟			
روشنایی			
آیا بازتابنده لامپ تمیز است؟			
آیا لامپ‌ها سوخته‌اندد؟			
آیا مناطقی تاریک هستند؟			

انبار مواد			
آیا مواد به‌طور منظم و ایمن انباشته شده‌اند؟			
آیا پله یا چهارپایه برای دسترسی به مواد در قفسه‌های بالاتر وجود دارد؟			
آیا قفسه‌های ذخیره‌سازی بیش از حد بارگذاری شده‌اند یا بیش از ظرفیت نامی خود قرار دارند؟			
آیا اجسام بزرگ و سنگین در قفسه‌های پایینی نگهداری می‌شوند؟			
آیا معابر و محل کار از موانع پاک هستند؟			
موارد کلی ایمنی و بهداشت			
آیا از سیم‌های کششی زیاد استفاده می‌شود؟ (اگر چنین است، نصب سیم‌کشی دائمی را در نظر بگیرید)			
آیا سیم‌های برق یا تلفن در مناطقی که ممکن است کارمندان درگیر شوند در معرض دید قرار دارند؟			
آیا سیم‌کشی برق به درستی نصب شده است؟			
آیا ماشین‌ها به درستی محافظت می‌شوند؟			
آیا تجهیزاتی دارای برجستگی‌های فلزی تیز هستند؟			
آیا وسایل دیوار و سقف به‌طور ایمن بسته می‌شوند؟			
آیا کاغذ و ضایعات به درستی دفع می‌شوند؟			
آیا کشوهای میز و پرونده در زمان عدم استفاده بسته نگه داشته می‌شوند؟			
آیا لوازم اداری به درستی نگهداری می‌شود؟			
آیا مواد روی میز یا کابینت چیده می‌شوند؟			
آیا کشوهای کابینت پرونده بیش از حد بارگذاری شده است؟			
آیا سنگین‌ترین اقلام در کشوهای پایین بارگذاری می‌شوند؟			
آیا قفسه‌ها در صورت لزوم به‌طور ایمن به دیوار بسته می‌شوند؟			
آیا سطل زباله‌ها در جایی قرار می‌گیرند که ممکن است خطر زمین خوردن داشته باشند؟			

آموزش شناسایی علائم ایمنی GHS اطلاعات به روز شده ۲۰۲۳

مخاطرات سلامت Health Hazard



این طرح گرافیکی[1] برای ترکیبات شیمیایی استفاده می‌شود.

- Carcinogen–may cause cancer (ترکیبات سرطان‌زا- می‌تواند باعث سرطان گردد)
- Respiratory sensitizer–may cause respiratory irritation (حساس‌کننده سیستم تنفسی - می‌تواند باعث حساسیت سیستم تنفسی گردد)
- Reproductive toxicity–may damage fertility or the unborn child (سمیت سیستم تولید مثل – می‌تواند باعث آسیب سیستم باوری و جنین شود)
- Target organ toxicity–may cause damage to bodily organs (سمیت اندام هدف – ممکن است باعث آسیب به اندام‌های بدن شود)
- Mutagenicity–may cause genetic defects (جهش‌زایی -می‌تواند باعث نقص در سیستم ژنتیکی گردد)
- Aspiration toxicity–may be fatal if swallowed and it enters the airways (سمیت بالا کشیدن ترکیب در مجرای تنفسی –ورود آن به مجاری هوایی ممکن است کشنده باشد)

[1] Pictogram

خطر شعله‌ور شدن Fire Danger



این علامت بر روی برچسب ترکیبات به‌شرح زیر نصب می‌شود:

- Flammables–which are gases, aerosols, liquids, or solids that will burn or ignite under certain conditions, (آتش‌زا- مواد به‌صورت گازها، آئروسل‌ها، مایعات و یا مواد جامد که تحت شرایط خاص ایجاد کننده حریق یا انفجار هستند)
- Self-Reactive–heating alone, without air, may cause fire or explosion, (ترکیب واکنش‌زا–حرارت به تنهایی و بدون هوا، می‌تواند ایجاد حریق یا انفجار نماید)
- Pyrophoric–in small amounts, may ignite within 5 minutes after contact with air, (مواد آتش‌زا (پیروفوریک) - در مقادیر کم، ممکن است در عرض ۵ دقیقه پس از تماس با هوا مشتعل شوند.)
- Self-Heating–which may catch fire only in large amounts and after long periods of time when exposed to air, (خود گرمایش — که ممکن است فقط در مقادیر زیاد و پس از مدت زمان طولانی در معرض هوا آتش بگیرد)
- Organic peroxides–which, when heated, may cause fire or explosion; may be sensitive to impact or friction; and may react dangerously with other chemicals. پراکسیدهای آلی - زمانی که گرم می‌شوند، ممکن است باعث آتش‌سوزی یا انفجار شوند. این مواد ممکن است به ضربه یا اصطکاک حساس باشند و با سایر مواد شیمیایی واکنش‌های خطرناکی نشان دهند.

تحریک‌کننده Irritant



- Irritant–irritates the skin or eyes; (تحریک کننده: پوست و چشم را تحریک می‌کند)
- Skin sensitizer–which is an allergic response following skin contact; (حساس‌کننده پوست: باعث واکنش آلرژیک بعد از تماس پوستی است)
- Acute toxicity–which may be fatal or cause organ damage from a single short-term exposure; (سمیت حاد: که ممکن است در یک مواجهه کوتاه‌مدت کشنده باشد)
- Narcotic effects like drowsiness, lack of coordination, and dizziness; (اثر تخدیری از قبیل خواب آلودگی، عدم هماهنگی اندام‌های دست و پا و گیجی)
- Respiratory tract irritation. (تحریک‌کننده مجاری تنفسی)

سیلندر گاز Gas Cylinder



این علامت روی برچسب شیمیایی به این معنی است که این ماده یک گاز فشرده، مایع یا محلول تحت فشار ۲۹ پوند بر اینچ مربع یا بیشتر است.

علامت آتش بر روی دایره Flame over Circle



این علامت روی برچسب شیمیایی به این معنی است که این ماده یک اکسیدکننده است. اکسیدکننده‌ها ممکن است با افزایش غلظت اکسیژن در هوا باعث آتش‌سوزی شوند.

خوردگی Corrosion



این علامت روی برچسب شیمیایی به این معنی است که این ماده باعث سوختگی پوست، آسیب به چشم یا تخریب فلزات می‌شود.

جمجمه و استخوان‌های متقاطع Skull and Crossbones



موادی که خطر سمیت حاد دارند، این علامت را روی برچسب شیمیایی خود دارند. سمیت حاد به این معنی است که مواجهه استنشاقی، گوارشی یا پوستی با یک دُز از آن ماده شیمیایی ممکن است سمی یا کشنده باشد.

بمب در حال انفجار Exploding Bomb



این طرح گرافیکی بمب در حال انفجار بر روی برچسب‌های شیمیایی موادی به‌شرح زیر استفاده می‌شوند:

- Explosives—which is a solid or liquid chemical capable of a chemical reaction that causes damage to the surroundings, (مواد منفجره - که یک ماده شیمیایی جامد یا مایع است که قابلیت واکنش شیمیایی دارد و باعث آسیب به محیط اطراف می‌شود)
- Organic Self-Reactive—heating may cause fire or explosion without the need for air, or peroxides—again, heating may cause fire or explosion. (واکنش خودبخودی - گرمایش ممکن است بدون نیاز به هوا باعث آتش‌سوزی یا انفجار شود، یا پراکسیدهای آلی - حرارت دادن ممکن است باعث آتش‌سوزی یا انفجار شود.)

علامت خطر برای محیط زیست Bonus Pictogram! Environment



این علامت به این معنی است که که ماده شیمیایی برای آبزیان سمیت ایجاد می‌کند.

منابع و مراجع اطلاعاتی

IH 101 Part 2 QEAs – Essential Risk Assessment Methodologies for Industrial Hygiene Program Management – Velocity EHS. Available from: https://www.ehs.com/2021/03/ih-101-part-2-qeas-essential-risk-assessment-methodologies-for-industrial-hygiene-program-management/

Hazardous Chemical Process Risk Assessment Australia. 2005. Available from: https://staff.flinders.edu.au/content/dam/staff/documents/whs/forms/workplace-substances-process-risk-assessment.pdf

Hazardous Substances Risk Assessment. City of Plymouth 2006. Available from: https://utcplymouth.org/assets/uploads-documents/UTC023-COSHH-Policy.pdf

Control of Substances Hazardous to Health (COSHH) Policy and Procedure 2007. Available from: https://www.hse.gov.uk/cleaning/topics/coshh.html

Assessment of health risk arising chemicals hazardous to health at workplace (A manual of recommended practice). 2nd Edition. Department of Occupational Safety and Health: Ministry of human Resources Malaysia. 2018. Available from: https://www.dosh.gov.my/images/dmdocuments/glx/garispanduan27.pdf

Qualitative Exposure assessment a process guide. June 2019. Developed and owned by Clean Electronics Production Network an innovation network of Green America's Center of Sustainability Solutions. Available from: https://cleanelectronicsproduction.org/downloads/qeaprocessguideaugust2019.pdf

حسینی‌جناب و، پرمون غ. ارزیابی ریسک مواد شیمیایی در تماس‌های شغلی کتاب جامع بهداشت عمومی. ۱۴۰۱. انتشارات فن آوران.

Golbabaie F, Eskandari D, Rezazadeh Azari M, Jahangiri M, Rahimi M, Shahtaheri J (2012).

Health risk assessment of chemical pollutants in a petrochemical complex. Iran Occupational Health; 9(3):11-21.

Malakouti J, Rezazadeh Azari M and Goneh Farahani A (2010). Occupational exposure risk assessment of researchers to harmful chemical agents. Journal of IRIAF Health administration; 13(3-4):31-35.

Health and Safety Executive. Good practice and pitfalls in risk assessment. https://www.hse.gov.uk/research/rrhtm/rr151.htm

National Institutes of Health. Review and Improvement of Chemical Hazard Risk. 2021. Available from: https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC8431554/

World Health Organization (WHO). Globally Harmonized System of Classification and labelling Chemicals. 7nd Edition. 2017. New york & Geneva. Available from: https://unece.org/DAM/trans/danger/publi/ghs/ghs_rev07/English/ST_SG_AC10_30_Rev7e.pdf

National Research Council, Division on Earth, Life Studies, Board on Environmental Studies, Board on Chemical Sciences, Committee on the Design, Evaluation of Safer Chemical Substitutions, A Framework to Inform Government, Industry Decisions. A framework to guide selection of chemical alternatives. Appendix: Overview of the GHS Classification Scheme in Hazard Classification. 2014. Available from: https://nap.nationalacademies.org/read/18872/chapter/20

Mali R. GHS Classification. May 2014. Available from: https://www.era-environmental.com/blog/ghs-hazard-classification

فصل ۵: روش‌های نمونه‌برداری از آلاینده‌های شیمیایی هوای محیط کار

۵–۱) مقدمه

کارکنان در حین انجام وظایف محوله در بسیاری از مراکز صنعتی، کشاورزی و خدماتی در معرض گازها، بخارات و آئروسل‌های هوا قرار دارند. پس از انجام فرآیند ارزیابی ریسک کیفی، مواجهه کارکنان در شرایط خاص و یا در صورت لزوم می‌بایست با استفاده از روش‌های استاندارد توصیه‌شده از سوی سازمان‌های NIOSH یا OSHA مورد نمونه‌برداری و آنالیز قرار گیرد. نویسنده کتاب توصیه می‌نماید روش‌های نمونه‌برداری و آنالیز منتشرشده از وزارت بهداشت و یا ترجیحاً روش‌های مرجع از دو سازمان NIOSH و OSHA برای دستیابی به اطلاعات به‌روز جهت ارزشیابی مواجهه شغلی از سایت‌های اینترنتی به شرح زیر دریافت گردد:

https://markazsalamat.behdasht.gov.ir/

https://www.cdc.gov/niosh/docs/2003-154/method-casall.html

https://www.osha.gov/chemicaldata/methods

هدف از این فصل کتاب، ارزشیابی مواجهه شغلی با ترکیبات شیمیایی و آشنایی با وسایل و روش‌های نمونه‌برداری است. در این فصل، مروری بر اصول نمونه‌برداری غیر از استراتژی نمونه‌برداری ارائه می‌گردد که به‌صورت دو شیوه نمونه‌برداری فعال و غیر فعال و همچنین روش‌های انتقال و نگهداری نمونه‌ها تا زمان آنالیز مطرح می‌شود. همچنین در این فصل، برگردان مختصری از روش‌های نمونه‌برداری و آنالیز به زبان فارسی برای برخی از ترکیبات مندرج در فصول ۶ و ۸ این کتاب نیز ارائه شده است.

به‌طور کلی از کارشناسان محترم بهداشت حرفه‌ای تقاضا می‌شود برای آگاهی از جزئیات روش‌های نمونه‌برداری و آنالیز به مراجع مرتبط و به‌خصوص سازمان NIOSH مراجعه نمایند و در صورت نیاز به اطلاعات تخصصی در مورد روش‌ها، می‌توانند با نویسنده کتاب از طریق آدرس ایمیل mrazari@sbmu.ac.ir تماس بگیرند. ضمناً شرح دستگاه‌های قرائت مستقیم برای اندازه‌گیری گازها و بخارات و نحوه کاربرد آن‌ها نیز در این فصل ارائه می‌شود.

۵-۱-۱) تعیین مدت زمان نمونه‌برداری

قبل از شروع نمونه‌برداری، با توجّه به روش ارائه شده و حد آستانه مجاز تماس شغلی، مدت زمان نمونه‌برداری فردی از کارکنان به‌شرح زیر تعیین می‌گردد:

۵-۱-۱-۱) مدت زمان نمونه‌برداری بر اساس استانداردهای اعلام شده

ترکیبات شیمیایی دارای استانداردهای حد تماس شغلی (TLV) یا (OEL) به‌صورت میانگین وزن یافته زمانی (TWA)[1] یا مواجهه کوتاه‌مدت (STEL) و سقف (C) دارند که داده‌های مواجهه شغلی در برنامه ارزشیابی مواجهه شغلی کارکنان می‌بایست با این استانداردها در دوره‌های زمانی خاص، مورد مقایسه قرار داده شوند. به‌طور کلی برای اکثر ترکیبات شیمیایی، استانداردها به‌صورت میانگین وزن یافته زمانی TWA به تنهایی و یا با استاندارد کوتاه‌مدت STEL ارائه شده است. در برخی موارد دیگر، برای ترکیبات شیمیایی تحریک‌کننده قوی، استانداردهای مواجهه با ارائه یکی از دو پارامتر TLV-C یا TLV-STEL و یا ترکیبی با TLV-TWA ارائه شده‌اند.

مواجهه با ترکیبات شیمیایی در طول یک شیفت کاری معمولاً به‌صورت متغیر است (شکل ۱-۵). یکی از روش‌های ارزشیابی ترکیباتی که پیامد بهداشتی کوتاه‌مدت ندارند، مقایسه مقادیر چند مورد از پایش آن‌ها در هوا با مقادیر TWA مواجهه در طول یک شیفت کاری است که به‌شرح فرمول ۱-۵ محاسبه می‌شود. یک روش دیگر ارزشیابی این گروه از ترکیبات، مقایسه مقادیر به‌دست‌آمده از پایش مواجهه هشت‌ساعته کارکنان با مقادیر TLV-TWA می‌باشد.

فرمول ۱-۵)

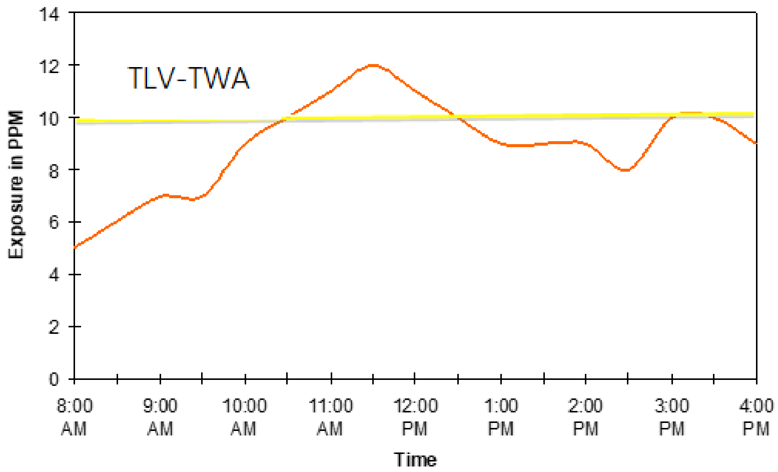
$$TLV - TWA = \frac{\sum_{i=1}^{n} C_n T_n}{\sum_{i=1}^{n} T_n}$$

که در آن:

C= غلظت

T= زمان

[1] Time Weighted Average



شکل ۱-۵) مثالی از تغییرات مواجهه کارکنان در طول یک شیفت کاری

نمونه‌برداری از آلاینده‌های هوابرد محیط کار ترجیحاً به‌صورت تمام‌وقت (شیفت کامل) توصیه شده است. امّا در شرایطی که نمونه‌برداری تمام شیفت امکان‌پذیر نباشد و با اطمینان از یکسان بودن سرعت انجام کار و مواجهه تقریباً یکنواخت در طول شیفت کاری، زمان نمونه‌برداری ممکن است به زمان کوتاه‌تر تا چهار ساعت کاهش یابد.

بسیاری از استانداردهای حد تماس شغلی برای مواجهه کارکنان با ترکیباتی مانند فرمالدئید و متیلن کلراید، با محدودیت زمانی برای مواجهه‌های شغلی کوتاه‌مدت (STEL) مطرح شده‌اند. این محدودیت زمانی برای مواجهه شاغلین ۱۵ دقیقه‌ای می‌باشد و افراد می‌توانند حداکثر چهار بار در طول شیفت کاری خود و به فاصله یک ساعت بین هر بار تکرار با آن مواجهه داشته باشند. نمونه‌برداری STEL با گرفتن چندین نمونه از هوای منطقه تنفسی به مدت ۱۵ دقیقه در یک شیفت و مطابق با روش‌های نمونه‌برداری سازمان‌های NIOSH و OSHA انجام می‌شود.

بسیاری از آلاینده‌های دیگر هوا دارای محدودیت زمانی به‌صورت لحظه‌ای با سقف معینی از غلظت هستند. حد استاندارد تماس شغلی در اینگونه موارد به‌صورت TLV-C مشخص می‌شود. لازم به‌ذکر است که مدت زمان نمونه‌برداری برای مقایسه با حدود TLV-C در حداقل زمان ممکن تنظیم می‌شود و یا در موارد دیگر این اندازه‌گیری‌ها با استفاده از دستگاه‌های قرائت مستقیم کالیبره‌شده انجام می‌شود.

۵-۱-۱-۲) مدت زمان نمونه‌برداری بر اساس ظرفیت حجمی نمونه‌بردارها

محدودیت ظرفیت نمونه‌بردارهای مختلف که در روش‌های استاندارد اعلام شده است، می‌تواند با فرمول زیر محاسبه شود. حداقل مدت زمان نمونه‌برداری بر اساس گذر حجمی متعارف و فرمول‌های زیر محاسبه می‌شود.

فرمول ۲-۵) $$T_{min}=V_{min}/Q$$

که در آن:

T_{min}= حداقل زمان نمونه‌برداری برای جمع‌آوری مواد شیمیایی متناسب با حساسیت روش آنالیز (دقیقه)
V_{min}= حداقل حجم نمونه‌برداری قید شده در روش (لیتر)
Q= گذر حجمی نمونه‌برداری بر اساس روش (لیتر بر دقیقه)

به‌عنوان مثال، اگر در روش استاندارد حداقل و حداکثر حجم نمونه‌برداری به ترتیب معادل ۲۴۰ و ۴۸۰ لیتر و گذر حجمی معادل L/min ۲ باشد، مدت زمان نمونه‌برداری بر اساس فرمول ۲-۵ برای حداقل حجم نمونه معادل دو ساعت (پوشش یک شیفت نمونه‌برداری را می‌توان با استفاده از چهار بار نمونه‌برداری دو ساعته انجام داد) و برای حداکثر حجم نمونه‌برداری، به مدت چهار ساعت خواهد بود. در صورت حفظ حجم نمونه‌برداری در میزان ۲۴۰ لیتر و کاهش گذر حجمی نمونه‌برداری به میزان L/min ۰.۵، مدت زمان نمونه‌برداری به مدت ۸ ساعت افزایش می‌یابد.

مثال: در روش آزمایشگاهی OSHA برای نمونه‌برداری از ترکیب متیلن کلراید، گذر حجمی هوا معادل L/min ۰.۰۵ و حداکثر حجم نمونه‌برداری معادل ۳ لیتر گزارش شده است که بر اساس فرمول ۲-۵، به ۶۰ دقیقه نمونه‌برداری برای هر مرتبه نمونه‌برداری نیاز خواهد بود. برای پوشش کل شیفت، چندین بار نمونه‌برداری به‌صورت اتفاقی و با حداکثر زمان ۶۰ دقیقه می‌بایست انجام شود.

جدول ۱-۵) تعیین حداقل تعداد نمونه‌های تصادفی بر اساس مدت زمان نمونه‌برداری

حداقل تعداد نمونه‌برداری	میانگین مدت زمان نمونه‌برداری
≥۳۰	۱۰ ثانیه
≥۲۰	۱ دقیقه
≥۱۲	۵ دقیقه
≥۴	۱۵ دقیقه
≥۳	۳۰ دقیقه
≥۳	۱ ساعت
≥۲	۲ ساعت

لازم به‌ذکر است برای ترکیبات تحریک‌کننده قوی که TLV-C دارند، باید در اوج زمان‌های کاری به‌صورت مقطعی و حداقل زمان ممکن برای گرفتن پاسخ و با دستگاه قرائت مستقیم کالیبره‌شده و یا روش‌های معمول، چندین بار در زمان‌های مختلف نمونه‌برداری صورت گیرد. در مورد ترکیبات دیگری که دارای TLV-STEL هستند نیز نمونه‌برداری‌ها بر اساس چند نمونه‌برداری هدفمند در اوج زمان‌های کاری انجام می‌شود و یا در صورت عدم اطلاع، چند نمونه به‌صورت تصادفی و در مدت زمان پانزده دقیقه می‌بایست گرفته شود. به‌طور کلی، حداقل تعداد نمونه‌برداری برای مطابقت با TLV-TWA و یا TLV-STEL و یا TLV-C بر اساس مدت زمان نمونه‌برداری تعیین می‌شود (جدول ۱-۵).

۵-۱-۲) نمونه‌برداری فعال و غیر فعال

نمونه‌برداری فعال[1] از ترکیبات هوا برای جمع‌آوری گازها، بخارات و ذرات هوابرد بر روی بستر جاذب و یا فیلتر، نیازمند به پمپ نمونه‌برداری است. لازم به‌ذکر است اخیراً نمونه‌برداری غیرفعال[2] نیز مطرح شده است که عمدتاً برای نمونه‌برداری از گازها و بخارات استفاده می‌شود. در روش نمونه‌برداری غیرفعال یا نمونه‌برداری

[1] Active Sampling
[2] Passive Sampling

انتشاری[1] نیازی به استفاده از پمپ نمونه‌برداری وجود ندارد. جمع‌آوری نمونه‌ها در این روش در جاذب و بر اساس فرآیند طبیعی انتشار[2] ترکیب بر روی بستر جاذب انجام می‌شود.

اکثر قریب به اتفاق روش‌های استاندارد سازمان NIOSH برای نمونه‌برداری و آنالیز آلاینده‌های هوا به‌صورت نمونه‌برداری فعال ارائه شده است و فقط به‌طور استثنایی دو روش را به‌صورت نمونه‌برداری غیرفعال برای ترکیبات تولوئن و دی‌اکسید ازت به ترتیب با شماره‌های ۴۰۰۰ و ۶۷۰۰ ارائه داده است. از طرفی، تعداد روش‌های نمونه‌برداری غیر فعال از طرف سازمان OSHA قدری گسترده‌تر است (جدول ۲-۵).

جدول ۲-۵) روش‌های نمونه‌برداری غیرفعال ارائه شده توسط سازمان OSHA

نام ترکیب	نوع نمونه‌بردار و شرکت سازنده	مشخصات روش‌ها و سازمان مربوطه
Benzene	**SKC 575-002 3M 3520**	**OSHA 1005**
2-Butanone (MEK)	**SKC 575-002 3M 3520**	**OSHA 1004**
Butyl acetate (*n, iso, sec, tert isomers*)	**SKC 575-002 3M 3520**	**OSHA 1009**
Ethyl benzene	**SKC 575-002**	**OSHA 1002**
Ethylene oxide	**3M 3551**	**OSHA 49**
Formaldehyde	**AT Aldehyde Monitor 571 SKC UMEx 100 Supelco DSD-DNPH**	**OSHA 1007**
Hexone (MIBK)	**SKC 575-002 3M 3520**	**OSHA 1004**
Nitrous oxide	**Kem Vapor Trak Nitrous Oxide Monitor**	**Kem Medical Products Method**
Radon	**E-Perm**	**OSHA-208**
Styrene	**SKC 575-006 3M 3520**	**OSHA 1014**
Tetrachloroethylene	**SKC 575-002**	**OSHA 1001**
Trichloroethylene	**SKC 575-002**	**OSHA 1001**
Thoron	**E-Perm**	**Contact Oregon OSHA Laboratory**
Toluene	**SKC 575-002 3M 3520**	**OSHA 111**
Xylene (*o, m, p isomers*)	**SKC 575-002 3M 3520**	**OSHA 1002**

علی‌رغم امتیازات نمونه‌برداری به شیوه غیرفعال، ضعف عملکردی آن‌ها برای نمونه‌برداری از ذرات و همچنین مقدار زیاد خطاهای نمونه‌برداری توسط این روش، منجر به کاربرد محدود آن‌ها می‌شود. انتظار می‌رود که به دلیل ویژگی‌های مطلوب نمونه‌بردارهای غیرفعال مانند وزن کم آن‌ها، عدم مداخله در کار کارگر، کم‌هزینه بودن روش نمونه‌برداری، عدم نیاز به کالیبراسیون نمونه‌بردار و همچنین عدم نیاز به پمپ‌های

[1] Diffuse Sampling

[2] Diffusion

گران‌قیمت و تخصص، کاربرد این شیوه نمونه‌برداری در سال‌های آینده با پیشرفت و تکامل نمونه‌بردارهای غیرفعال افزایش یابد.

۵–۱–۳) کالیبراسیون گذر حجمی روتامترها و پمپ‌های نمونه‌بردار فردی

پمپ نمونه‌برداری فردی[1] در دهه‌های گذشته رایج‌ترین دستگاه مورد استفاده در نمونه‌برداری از آلاینده‌های شیمیایی در مهندسی بهداشت حرفه‌ای بوده است و معمولاً در گذشته بیشتر از پمپ نمونه‌برداری SKC در مدل‌های مختلف استفاده شده است. این پمپ‌ها بسته به کاربرد آن‌ها برای نمونه‌برداری از گاز و بخار یا ذرات معلق هوا، در محدوده گذر حجمی ۵۰۰ تا ۴۰۰۰ و ۱۰ تا ۲۰۰ میلی‌لیتر در دقیقه (ml/min) مورد استفاده قرار می‌گیرند. رایج‌ترین دستگاه کالیبراسیون پمپ نمونه‌بردار فردی در محیط کار و در آزمایشگاه‌ها، روتامتر کالیبره‌شده است. تنظیم گذر حجمی پمپ‌ها معمولاً با استفاده از دستگاه روتامترهای الکترونیکی در محل مورد نظر برای نمونه‌برداری با شرایط محیطی انجام می‌شود.

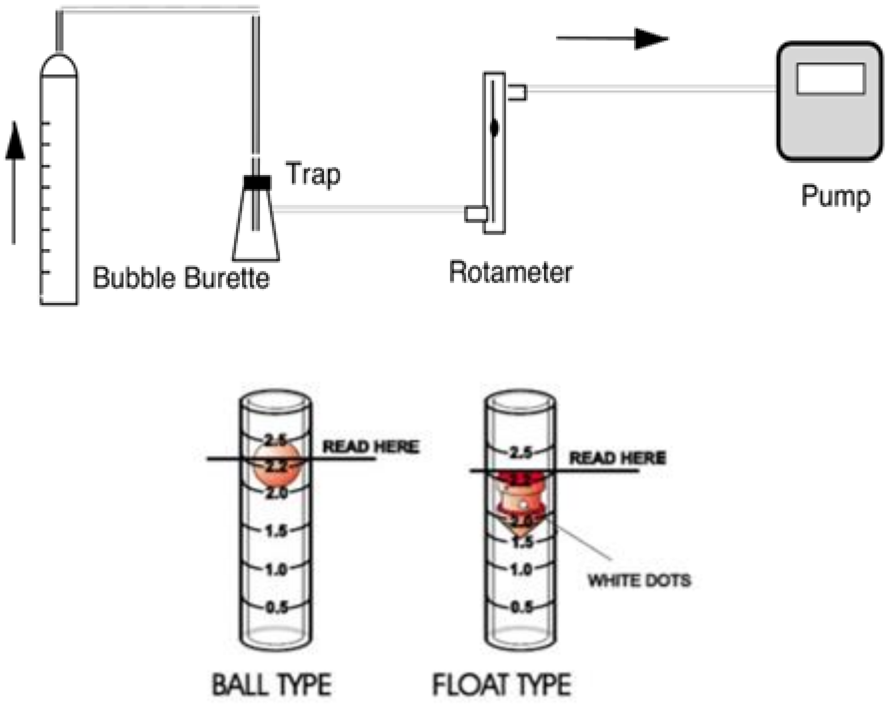
لازم به‌ذکر است که روتامترهای معمولی (متشکل از یک استوانه شیشه‌ای، بدون اصطکاک و ساخته شده با طول و قطر دقیق) در مرتبه نخست می‌بایست توسط ستون حباب صابون (به‌عنوان استاندارد اولیه) کالیبره گردد (شکل ۲-۵). لازم به‌ذکر است که روتامتر می‌تواند با دستگاه اندازه‌گیری دقیق جریان هوا متشکل از سیستم الکترونیکی مجهز به چشم و تایمتر الکتریکی کالیبره شود (شکل ۳-۵). ستون حباب صابون یک دستگاه کالیبراسیون اولیه و روتامتر یک کالیبراسیون ثانویه است. به‌طور کلی ساختار روتامتر پیچیده‌تر از ستون حباب صابون است و در نتیجه به‌طور ذاتی از دقت و صحت کمتری برخوردار است و خوانش آن تحت تأثیر تغییرات دما، فشار و چگالی گاز تغییر خواهد کرد

روتامتر از یک لوله عمودی مخروطی تشکیل شده است که حاوی یک شناور است. شناور روتامتر در اتصال با پمپ نمونه‌بردار فردی و متناسب با گذر حجمی هوای عبوری از آن، تا ارتفاع مشخصی بالا می‌رود که به

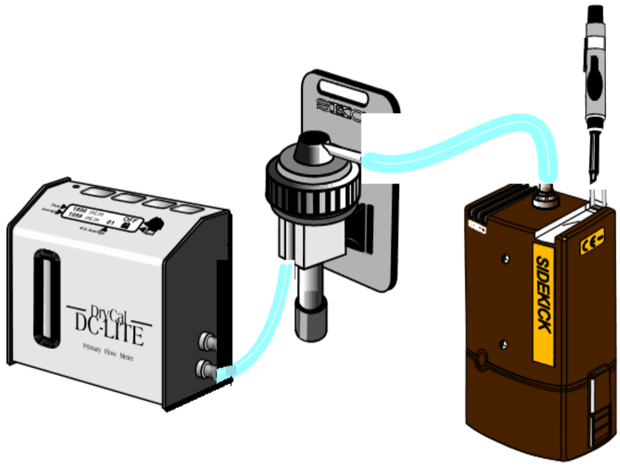
[1] Personal Sampling Pump

سرعت جریان و چگالی هوای در حال حرکت از طریق لوله اتصال بستگی دارد. روتامترها می‌بایست توسط ستون حباب صابون کالیبره شوند تا در اندازه‌گیری هواگذر از ۱ میلی‌لیتر تا چند صد لیتر در دقیقه به‌کار برده شوند. دقت روتامتر در صورت نصب آن به‌صورت قائم بر زمین در دامنه ۱٪± تا ۱۰٪± متغیر خواهد بود.

دستگاه‌های الکترونیکی یا سیستم‌های پیشرفته‌تر ستون حباب صابون نیز ممکن است برای کالیبراسیون پمپ مورد استفاده قرار گیرند، ولی به دلیل هزینه‌های بالا و عدم دسترسی گسترده در ایران، کاربرد آنها رایج نمی‌باشد. استفاده از این سیستم‌های پیشرفته به‌خصوص برای گذرهای حجمی کم نمونه‌برداری از گازها و بخارات، بسیار مناسب است زیرا گذر حجمی معمول آنها در دامنه ۱ میلی‌لیتر در دقیقه تا ۳۰ لیتر در دقیقه است. یکی دیگر از کالیبراتورهای الکتریکی مورد نظر سازمان OSHA دستگاه mini-Buck™ است (شکل ۵-۳) که قرائت هواگذر از آن با دو رقم اعشاری توصیه شده است. برای مثال، گذر حجمی به‌صورت L/min ۱.۰۰۶ باید L/min ۱.۰۱ گزارش شود.



شکل ۲-۵) کالیبراسیون روتامتر توسط ستون حباب صابون



شکل ۳-۵) دستگاه الکترونیکی ستون حباب صابون

به‌طور معمول کالیبراسیون روتامتر توسط ستون حباب صابون طبق مراحل زیر انجام می‌شود:

۱. **پمپ نمونه‌بردار برای کالیبراسیون روتامتر می‌بایست دارای باطری مناسب و شارژ شده باشد.**

۲. **مدار اتصال پمپ با روتامتر و ستون حباب صابون طبق شکل ۲-۵ برقرار شود.**

۳. **ستون حباب صابون قبل از استفاده می‌بایست مرطوب شده و به‌طور عمود بر روی زمین قرار گیرد.**

۴. **۴ الی ۶ گذر حجمی در محدوده معمول نمونه‌برداری گاز و بخار یا ذرات معلق هوا با تنظیم مکش در مقادیر مختلف و فلومتر پمپ انتخاب شود.**

۵. **با روشن نمودن پمپ و همزمان با ثبت زمان توسط کرنومتر، فرایند کالیبراسیون شروع شود.**

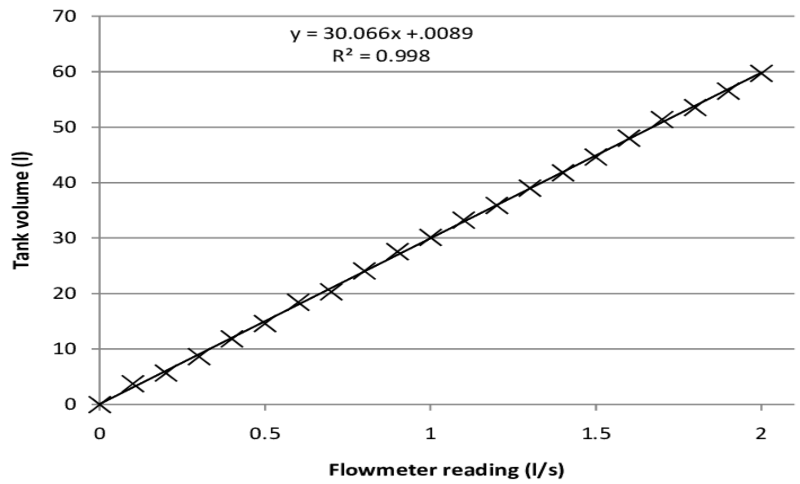
۶. **برای هر گذر حجمی مورد نظر در فرایند نمونه‌برداری، ۳ تا ۵ بار تکرار صورت پذیرد و میانگین گذر حجمی در ستون حباب صابون و روتامتر ثبت گردد.**

۷. **چارت کالیبراسیون برای روتامتر و ستون حباب (مبنای کالیبراسیون) برای ۴ تا ۶ گذر حجمی ترسیم شود (شکل ۴-۵).**

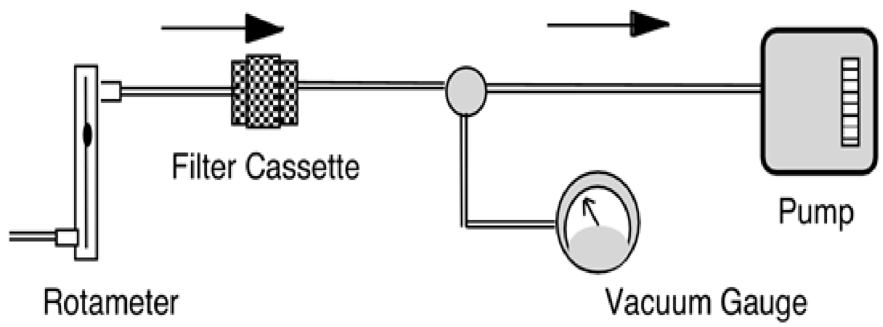
۸. **ست نمونه‌برداری شامل پمپ و لوله‌های اتصال و هد نمونه‌بردار (دستگاه نگهدارنده فیلتر و یا لوله جاذب) با روتامتر کالیبره شده تنظیم گردد (شکل ۵-۵)**

۹. **ست نمونه‌برداری فردی به کارکنان مورد نظر که از پیش تعیین شده است متصل گردد و نمونه‌برداری با ثبت زمان و گذر حجمی اولیه و مشخصات هر یک از کارکنان شروع شود (شکل ۶-۵).**

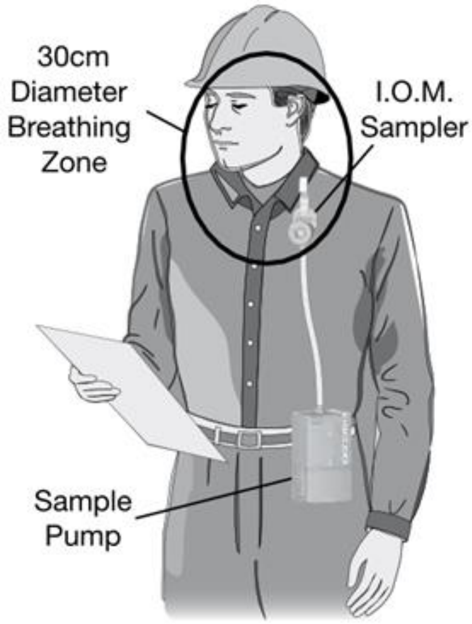
۱۰. در پایان نمونه‌برداری، با ثبت زمان و گذر حجمی، پمپ خاموش شده و نمونه‌های برداشته شده (فیلتر و لوله‌های جاذب) به‌طور اصولی برچسب زده شوند و برای ارسال به آزمایشگاه بسته‌بندی گردند.



شکل ۴-۵) چارت کالیبراسیون روتامتر



شکل ۵-۵) کالیبراسیون ست نمونه‌بردار توسط روتامتر کالیبره شده



شکل ۶-۵) اتصال ست نمونه‌بردار در منطقه تنفسی فرد

برای کارکنانی که از ماسک تنفسی معمولی یا ماسک‌های مختلف و سیستم‌های تأمین‌کننده هوا برای فرآیندهای خاص جوشکاری یا شن‌پاشی و ساچمه‌پاشی استفاده می‌کنند، نمونه‌بردار در خارج از ماسک تنفسی قرار داده می‌شود. این اقدام تنها برای تعیین ضریب حفاظتی ماسک تنفسی ضرورت دارد. برای کارکنانی که از کلاه-ماسک ایمنی ساده جوشکاری یا سپر حفاظتی برای صورت استفاده می‌کنند و این ابزارهای حفاظتی منطقه تنفسی را به‌طور کامل پوشش نمی‌دهند، دستگاه نمونه‌برداری باید زیر کلاه ایمنی قرار داده شود.

۵-۱-۴) نمونه‌برداری فعال از گاز و بخارات ترکیبات آلی فرار

۵-۱-۴-۱) کاربرد لوله‌های جاذب

گاز و بخار ترکیبات آلی را می‌توان با استفاده از واسطه‌های جاذب از جمله ذغال فعال و جاذب‌های دیگر پر شده در لوله‌های شیشه‌ای و پمپ‌های نمونه‌برداری ویژه با گذر حجمی کم[1]، با هواگذر کمتر از ۲۰۰

[1] Low Flow Pump

میلی‌لیتر در دقیقه نمونه‌برداری نمود. برای اطلاع از سایر لوله‌های نمونه‌بردار، گذر حجمی آن‌ها و حجم‌های لازم برای نمونه‌برداری از ترکیبات شیمیایی خاص، می‌توان به سایت‌های OSHA و NIOSH به آدرس‌های زیر مراجعه نمود:

https://www.skcinc.com/samplingguide/osha

https://www.cdc.gov/niosh/docs/2003-154/method-casall.html

لوله‌های جاذب[1] یکی از انواع واسطه‌های نمونه‌برداری است که در نمونه‌برداری از ترکیبات آلی فرار در هوا مورد استفاده قرار می‌گیرد و جذب‌کننده ترکیبات بر روی بستر نمونه‌بردار است. شرکت SKC برای اولین بار در سال ۱۹۷۳ لوله‌های جاذب تجاری را برای سازمان NIOSH تولید کرد. از آن زمان، SKC به‌عنوان یکی از شرکت‌های تأمین‌کننده نمونه‌بردارهای مختلف از جمله لوله‌های جاذب به فعالیت خود ادامه داده است.

برای انتخاب مناسب لوله‌های جاذب نمونه‌برداری، توجّه به اطلاعاتی به‌شرح زیر مورد نیاز می‌باشد:

۱- **خواص فیزیکی و شیمیایی ترکیب شیمیایی گاز و بخارات**

۲- **قطبی یا غیر قطبی بودن گازها و بخارات شیمیایی**

۳- **بررسی جاذب برای نمونه‌برداری گاز و بخارات بر اساس متون علمی روز**

۴- **لوله‌های جاذب متناسب با روش‌های استاندارد سازمان‌های NIOSH و OSHA**

به‌طور کلی، با توجّه به روش‌های استاندارد و حساسیت و ظرفیت جذب سطحی واسطه‌های جاذب، انواع نمونه‌بردار گاز و بخارات به‌شرح زیر قابل دسته‌بندی می‌باشند:

الف) لوله جاذب ذغال فعال[2] و واجذب توسط به روش شیمیایی توسط حلال CS_2

ب) لوله‌های جاذب پر شده از مواد Carboxen، Carbotrap، Carbopack، Tenax و Chromosorb (وجه اشتراک این جاذب‌ها، نوع واجذب ترکیبات نمونه‌برداری شده توسط آنها است که به‌صورت حرارتی صورت می‌پذیرد.)

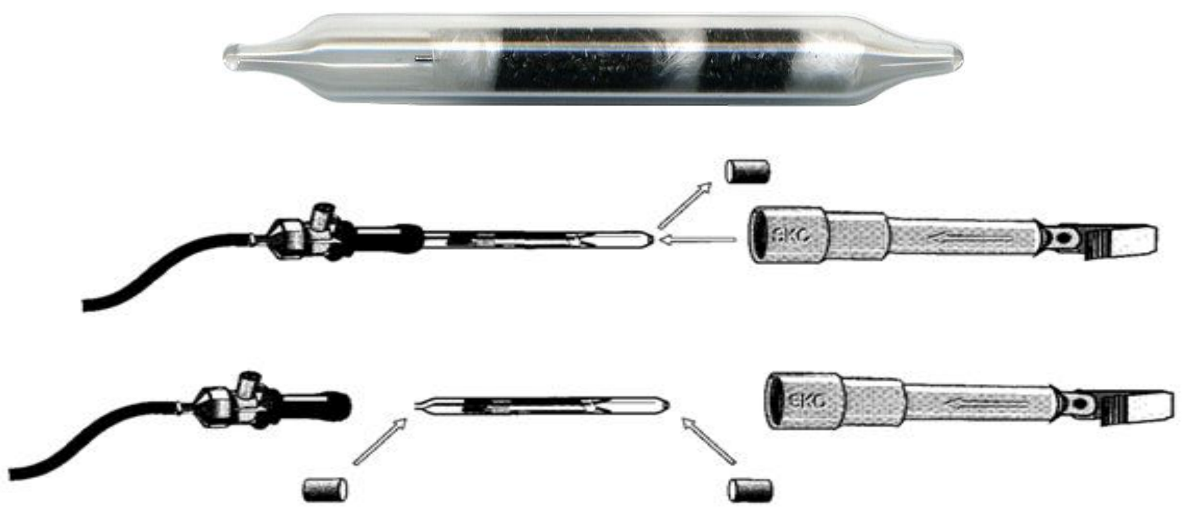
ج) نمونه‌بردارهای غیر فعال و بدون استفاده از پمپ

[1] Sorbent Tube

[2] Activated Charcoal

۵-۱-۴-۱-۱) کاربرد لوله‌های جاذب ذغال فعال برای نمونه‌برداری از ترکیبات آلی و استخراج به روش شیمیایی

برای نمونه‌برداری از لوله‌های جاذب پر شده از گرانول‌های کربن فعال[1]، یک قاب نگهدارنده لوله‌های جاذب و پمپ نمونه‌بردار فردی مورد نیاز است (شکل ۷-۵). هدف از کاربرد قاب نمونه‌برداری، محافظت از بدن در برابر دو انتهای شکسته‌شده لوله‌های جاذب شیشه‌ای است. برای حفظ امنیت و سلامت کارگر، قاب نمونه‌بردار حاوی لوله‌های ذغال فعال به یقه کارگر نصب می‌شود.



شکل ۷-۵) نمونه‌بردار ذغال فعال و قاب نگهدارنده آن برای نمونه‌برداری

لوله‌های جاذب ذغال فعال اغلب برای نمونه‌برداری از گازها و بخارات آلی فرار (VOCs) مانند ترکیبات BTEX استفاده می‌شوند. در نمونه‌برداری از ترکیبات VOCs، باید به عواملی مانند ظرفیت نمونه‌بردار در حجم نمونه‌برداری مشخص، نقطه شکست جذب سطحی[2] به لحاظ حجم نمونه‌برداری، تراکم آلاینده و

[1] Activated Charcoal

[2] breakthrough

همچنین اعتبار روش نمونه‌برداری و آنالیز توجّه داشت. لازم به ذکر است که اطلاعات بیشتر در زمینه نمونه‌برداری و آنالیز روش‌ها در فصل ۸ ارائه شده است.

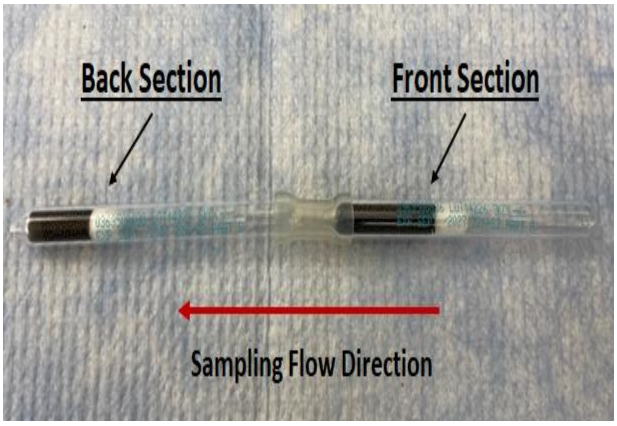
به‌طور کلی، فرایند جذب در لوله‌های جاذب ذغال فعال برای نمونه‌برداری از گازها و بخارات ترکیبات آلی، از طریق جذب سطحی این ترکیبات در سطوح متخلخل کربن فعال اتفاق می‌افتد. مواد جاذب کربن یا ذغال فعال از سوزاندن پوست نارگیل در شرایط اکسیژن کم تولید می‌شوند و سپس این مواد با اندازه مش ۲۰-۴۰ در لوله‌های نمونه‌بردار در دو بخش ۱۰۰ و ۵۰ میلی‌گرمی پر می‌شوند. دو بخش ذغال فعال توسط ترکیبات خنثی از قبیل فوم یا پشم شیشه از یکدیگر جدا می‌شوند. بخش بزرگ‌تر جاذب قسمت اولیه و بخش کوچکتر قسمت پشتیبان است. لوله‌های جاذب به شکلی به پمپ وصل می‌شوند که جریان هوا اول از قسمت جاذب بزرگ‌تر و سپس از قسمت پشتیبان عبور نماید. همان‌طور که هوا از طریق لوله جاذب کشیده می‌شود، ترکیب یا ترکیبات شیمیایی مورد نظر به بخش اولیه می‌رود و به روی سطح جاذب قرار می‌گیرند. هنگامی که جاذب در بخش اولیه اشباع شود، ترکیب از بخش اول به بخش پشتیبان منتقل می‌شود. این پدیده به‌عنوان نقطه شکست جذب سطحی شناخته می‌شود.

لازم به ذکر است که آزمایشگاه‌ها می‌بایست دو بخش لوله جاذب را به‌طور جداگانه آنالیز نمایند. بر اساس دستور سازمانNIOSH ، اگر بیش از ۱۰٪ از ترکیب شیمیایی در بخش پشتیبان یافت شود، این موضوع می‌تواند نشان‌دهنده از دست دادن بخشی از نمونه ترکیب شیمیایی در هنگام نمونه‌برداری باشد. به‌طور کلی، کاربرد صحیح روش‌های استاندارد نمونه‌برداری و آنالیز در فصل هشتم مطرح شده است.

در لوله‌های جاذب، امکان جابه‌جایی ترکیبات شیمیایی از قسمت اصلی به قسمت پشتیبان توسط فرایندهایی غیر از شکست جذب سطحی نیز وجود دارد. برای جلوگیری از جابه‌جایی ترکیب شیمیایی، توصیه شده است که نمونه‌ها در محیط سرد نگهداری و بدون تأخیر به آزمایشگاه برای آنالیز ارسال شوند. برخی از روش‌های نمونه‌برداری، مانند روش آزمایشگاهی OSHA-1065 برای اتانول، مشکل جابه‌جایی ترکیبات را با استفاده از دو لوله جاذب مستقل متصل شده به‌صورت سری حل نموده است. در این حالت، دو لوله نمونه‌بردار

به‌صورت سری برای پیشگیری از جابه‌جایی ترکیبات از قسمت اصلی به پشتیبان به یکدیگر متصل می‌شوند که بلافاصله پس از نمونه‌برداری از یکدیگر جدا شده و درپوش زده می‌شوند (شکل ۸-۵). لوله‌های جاذب در شرایط خاص نیز می‌توانند به‌صورت موازی برای نمونه‌برداری از ترکیبات مختلف استفاده شوند که بعد از نمونه‌برداری، لوله‌ها می‌بایست درپوش‌گذاری شده و سریعاً به آزمایشگاه ارسال شوند.





شکل ۸-۵) اتصال دو لوله جاذب از چپ به راست به‌صورت موازی و سری

لازم به ذکر است که ترکیبات موجود در هوا، شامل رطوبت، برای جذب سطحی بر روی سطوح کربن فعال رقابت می‌کنند. از این‌رو، حجم نمونه‌برداری و پارامترهای آن مانند سرعت جریان یا مدت زمان نمونه‌برداری در شرایط رطوبت بیشتر از ۸۰٪ یا در شرایطی که ترکیبات رقیب در غلظت‌های نسبتاً زیاد وجود دارند، می‌بایست کاهش یابند. همان‌طور که قبلاً اشاره شد، قبل از نمونه‌برداری، سیستم نمونه‌بردار شامل پمپ نمونه‌برداری متصل به هد نمونه‌بردار (لوله‌های جاذب) باید کالیبره شود.

برای کالیبراسیون پمپ، ضروری است که حتماً از لوله نمونه‌بردار یکبار مصرف استفاده شود. برای نمونه‌برداری، دو انتهای لوله جاذب باید شکسته شوند و دهانه‌های دو سر لوله تقریباً نصف قطر داخلی لوله باز شود. هنگام شکستن دو سر لوله جاذب، بهتر است از محافظ چشم استفاده شود و مراقب بود تا فرد مجروح نگردد. سپس لوله جاذب در قاب نگهدارنده لوله قرار می‌گیرد تا فرد مورد نظر برای نمونه‌برداری از تیزی قسمت‌های شکسته شده نمونه‌بردار محافظت شود.

لوله نمونه‌برداری می‌بایست به‌صورت عمودی بر روی بدن کارگر قرار گیرد، به‌گونه‌ای که دهانه آن در حین نمونه‌برداری به سمت پایین باشد. برای جلوگیری از آلودگی نمونه‌بردار، هوا نباید قبل از ورود به لوله جاذب از طریق هیچ شیلنگ یا لوله‌ای عبور کند (مگر در مواردی که از یک قطعه بسیار کوتاه لوله برای اتصال دو لوله به یکدیگر که به‌صورت سری استفاده می‌شوند، استفاده شود).

بلافاصله پس از نمونه‌برداری، لوله‌های جاذب می‌بایست با درپوش‌های پلاستیکی که توسط شرکت سازنده نمونه‌بردار ارائه شده‌اند، بسته شوند و سپس در یک کیسه پلاستیکی مناسب با مشخصات نمونه به آزمایشگاه ارسال شوند.

لازم به‌ذکر است که گذر حجمی پمپ‌ها باید پس از اتمام نمونه‌برداری مجدداً اندازه‌گیری شود و گذر حجمی پمپ‌ها قبل و بعد از نمونه‌برداری نباید بیشتر از ۵٪± اختلاف داشته باشد. به‌عنوان مثال، اگر سرعت جریان عبور نمونه هوا قبل از کالیبراسیون ۵۰ میلی‌لیتر در دقیقه باشد، سرعت جریان پس از کالیبراسیون برای داشتن یک نمونه‌برداری صحیح باید بین ۴۷.۵ و ۵۲.۵ میلی‌لیتر در دقیقه باشد.

بر اساس تحقیقی که توسط سازمان بهداشت و ایمنی صنعتی کشور ژاپن انجام شده است، ۴۹ ترکیب آلی فرار با تراکم غلظتی ۰.۵، ۱ و ۱.۵ برابر استاندارد حد آستانه تماس شغلی با استفاده از لوله‌های جاذب کربن فعال ساخته شده توسط سه شرکت Sibata Scientific Technology (carbon-bead active sampler)، SKC Inc. Anasorb CSC و Gastec (bead-shaped activated carbon tube) نمونه‌برداری شده و سپس با حلال دی‌سولفید کربن استخراج و با گاز کروماتوگرافی و آشکارساز جرمی آنالیز شدند. نتایج به‌دست آمده از این تحقیق نشان داد که همه نمونه‌بردارهای تولید شده توسط سه شرکت سازنده از میزان بازیابی مطلوب و مناسب برای ترکیبات برخوردار بودند و تنها نمونه‌بردار Sibata از نرخ بازیابی کمتری در مقایسه با لوله‌های جاذب دیگر برای ترکیب N-dimethylformamide برخوردار بود.

۵-۱-۴-۱-۲) نمونه‌برداری با لوله‌های جاذب و استخراج حرارتی

در چهل سال اخیر، با توجّه به دسترسی به روش‌ها و تجهیزات نمونه‌برداری و استخراج حرارتی نمونه‌ها، استفاده از روش‌های نمونه‌برداری جدید وابسته به واجذب حرارتی برای پایش مواجهه شغلی کارکنان افزایش یافته است. این روش‌های نمونه‌برداری و استخراج حرارتی، حساسیت بیشتری نسبت به روش‌های روتین با روش واجذب شیمیایی دارند. روش‌های جدید نمونه‌برداری، ضمن عدم نیاز به استفاده از حلال‌های سمی، به‌لحاظ تزریق کل مواد نمونه‌برداری‌شده دارای حساسیت به‌مراتب بیشتری هستند. با توجّه به اهمیت مواجهه‌های شغلی و محیطی و اثرات درازمدت ترکیبات آلی فرار در مقادیر بسیار کم در حد قسمت در تریلیون (PPT)، کاربرد نمونه‌بردارهای جدید همراه با روش گاز کروماتوگرافی مجهز به طیف‌سنجی جرمی برای آنالیز این نمونه‌ها رواج یافته است.

در برخی موارد، به‌ویژه در شرایط آلودگی با مخلوط‌های پیچیده ترکیبات شیمیایی، روش‌های پیشرفته نمونه‌برداری و آنالیز دستگاهی به‌صورت آنالیز فوری[1] در ایستگاه‌های هواشناسی متحرک استفاده می‌شود. در این موارد، ترکیبات هدف معمولاً توسط یک واسطه جاذب جامد پر شده در یک لوله استیل نمونه‌گیری شده و پس از واجذب حرارتی در دستگاه گاز کروماتوگرافی آنالیز می‌شوند.

تاریخچه واجذب حرارتی به چهل سال پیش برمی‌گردد. واجذب حرارتی در ابتدا به‌صورت بسیار ساده انجام می‌شد، ولی در حال حاضر این فرآیند بسیار پیچیده‌تر شده و به‌تبع آن، آنالیز با حساسیت بیشتری انجام می‌شود. روش جدید نمونه‌برداری و واجذب حرارتی می‌تواند برای برخی از گازها مانند اکسیدهای ازت و ترکیبات آلی فرار در دامنه C4 الی C44 استفاده شود. به‌طور کلی، این روش برای ترکیبات سنگین‌تر از C44 و بیشتر گازهای شیمیایی غیرآلی (مانند SO_2، HCl، CO، CO_2) مناسب نمی‌باشد.

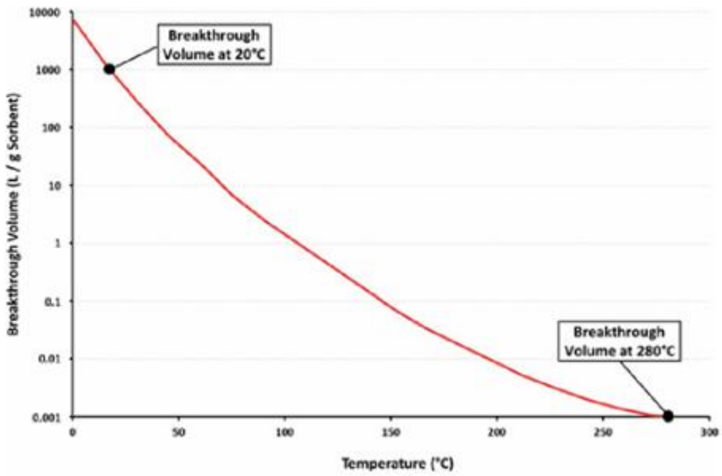
برای استخراج حرارتی[2] یا واجذب حرارتی، آماده‌سازی نمونه‌بردارها به شکل ویژه‌ای صورت می‌گیرد. به‌طور کلی حلال شیمیایی برای استخراج این نمونه‌بردارها مورد نیاز نیست. دستگاه واجذب نمونه‌های برداشته شده

---

[1] real-time

[2] Thermal desorption

می‌تواند به‌صورت تک مرحله‌ای[1] و در حالت پیشرفته به‌صورت دو مرحله‌ای[2] باشد. با توجّه به کاربرد سیستم‌های پیشرفته دو مرحله‌ای، در ادامه توضیحاتی در مورد کارکرد این سیستم در آنالیز ترکیبات شیمیایی موجود در هوای محیط‌های صنعتی و شهری ارائه شده است.

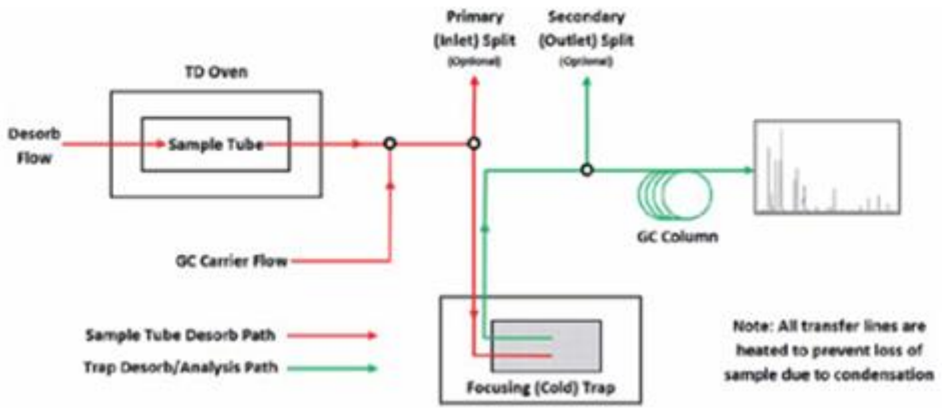


شکل ۹-۵) ارتباط شکست جذب سطحی مواد جاذب با حرارت

مشخصات واجذب حرارتی آنالیت‌ها از نمونه‌بردارها بر اساس پارامترهای حجم هوا و ارتباط آن با حرارت برای پدیده شکست جذب سطحی است. همان‌طور که در شکل ۹-۵ نشان داده می‌شود، شکست جذب سطحی (BTV) در یک بستر جاذب فرضی در ۲۰ درجه سانتی‌گراد معادل ۱۰۰۰ میلی‌لیتر است، اما در دمای ۲۸۰ درجه سانتی‌گراد، این مقدار در مقیاس میلی‌لیتر قرار می‌گیرد. به‌طور کلی در فرایند واجذب، لوله‌های نمونه‌بردار (که از جنس استیل پر شده با مواد جاذب هستند) در دامنه دمایی ۲۰۰ الی ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت چند دقیقه حرارت داده می‌شوند و سپس مواد جذب شده توسط حجم معینی از گازهای خنثی از قبیل نیتروژن، هلیوم و آرگون شسته شده و جریان گاز در یک سیستم مبرد[3] مجهز به مواد جاذب وارد و ترکیبات نمونه‌برداری شده مجدداً جذب می‌شوند. در مرتبه دوم واجذب، سیستم مبرد از دمای حدود ۳۰- درجه سانتی‌گراد سریعاً به ۲۰۰ الی ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد رسانده می‌شود و با یک حجم حداقل حدود ml

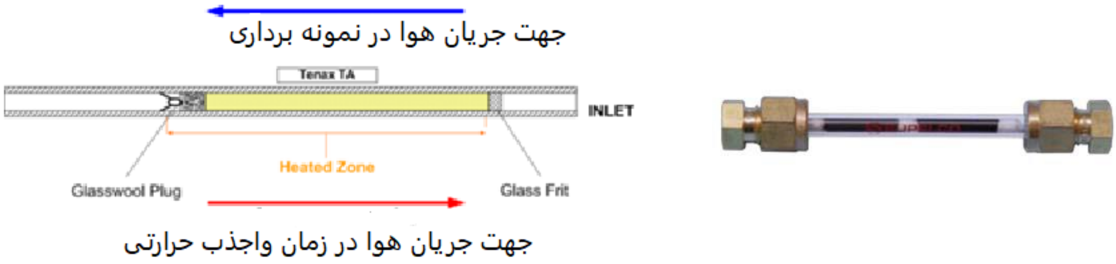
[1] Single Stage Thermal Desorption
[2] Double Stage Thermal Desorption
[3] Cold Trap

۱ شسته و مستقیماً به ستون دستگاه گاز کروماتوگرافی برای آنالیز تزریق می‌شود (شکل ۱۰-۵). به‌طور کلی، سیستم نمونه‌برداری که به‌صورت حرارتی مواد شیمیایی را واجذب می‌کند، عامل نمونه‌برداری و همچنین متراکم‌سازی ترکیب هوا از حجم معمول نمونه‌برداری در حد چند صد لیتر یا چند ده لیتر هوا به یک میلی‌لیتر است که در نهایت به ستون گاز کروماتوگرافی تزریق می‌شود. لازم به‌ذکر است که نمونه‌برداری با لوله‌های جاذب در این سیستم می‌تواند ۱۰۰۰ مرتبه بیشتر از لوله‌های جاذب ساده با استخراج شیمیایی باعث کاهش مقادیر حد تشخیص کیفی (LOD) و حد تشخیص کمّی (LOQ) شود و قابلیت اندازه‌گیری ترکیبات را به‌طور قابل توجّهی بالا ببرد. همچنین حداکثر حرارت در سیستم واجذب حرارتی به‌گونه‌ای انتخاب می‌شود که ترکیب یا ترکیبات واجذب‌شده در این فرایند تجزیه حرارتی نشوند. حداکثر حرارت مطلوب برای واجذب به شیوه حرارتی در حدود ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد گزارش شده است. اجزای دستگاه‌های واجذب حرارتی در شکل ۱۰-۵ نشان داده شده است که شامل کوره حرارتی برای واجذب نخست، سیستم مبرد برای جذب مرحله دوم و سپس واجذب حرارتی مرحله دوم با کمترین حجم گاز خنثی و تزریق مستقیم در ستون دستگاه گاز کروماتوگرافی می‌باشد.



شکل ۱۰-۵) طرح شماتیکی از دستگاه واجذب حرارتی دو مرحله‌ای

لوله‌های نمونه‌بردار در کوره حرارتی قرار داده می‌شوند و جریان واجذب حرارتی (به رنگ قرمز) متصل به فاز متحرک (گاز خنثی)، ترکیبات واجذب‌شده را به سیستم مبرد هدایت می‌کند. از آنجا، جریان مواد شیمیایی (به رنگ سبز) با حداقل حجم 1 ml به ستون دستگاه گاز کروماتوگرافی تزریق می‌گردد.



شکل ۱۱-۵) اشکال لوله‌های نمونه‌بردار

شرایط دستگاه واجذب حرارتی دو مرحله‌ای برای لوله‌های نمونه‌بردار پر شده از مواد جاذب (Tanex و Chromosorb و XAD-4) و مدت زمان لازم برای حرارت لوله‌های نمونه‌بردار در جدول ۳-۵ آورده شده است.

جدول ۳-۵) شرایط واجذب حرارتی توصیه شده برای دو لوله نمونه‌بردار پر شده از ترکیب Tenax و XAD4

شرایط واجذب نخست	Tanex TA	XAD4, Chromosorb 106
حرارت نمونه‌بردارها	280 °C	170 °C
زمان	10 Min	5 Min
حرارت لوله انتقال دهنده سیستم به GC	200 °C	200 °C
سیستم مبرد برای جذب مرتبه دوم	-30 °C	-30 °C
حرارت واجذب دوم	300 °C	300 °C
وزن مواد جاذب در سیستم مبرد	20mg	
نوع گاز حامل	Helium	
گذر حجمی فاز متحرک از سیستم جاذب دوم به GC	1 ml/min	

لازم به‌ذکر است که علاوه بر اطلاعات تنظیم دستگاه واجذب حرارتی، اطلاعات کاربرد نوع جاذب در متون علمی نیز موجود است. برای مثال، مؤسسه تحقیقات کشور آلمان (DFG)، نوع جاذب برای نمونه‌برداری از انواع ترکیبات را بر اساس قطبیت ترکیبات مورد نظر برای نمونه‌برداری، حجم شکست جذب سطحی و ظرفیت حجمی مواد جاذب ارائه کرده است. ضمناً آنالیز ترکیبات واجذب شده از سیستم واجذب حرارتی دو مرحله‌ای علاوه بر دستگاه گاز کروماتوگرافی، می‌تواند توسط دستگاه FT-IR نیز انجام گردد.

جدول ۴-۵) کاربرد مواد جاذب مختلف و استخراج حرارتی برای آنالیز ترکیبات مختلف

ترکیب	روش آنالیز از سازمان DFG	لوله جاذب	روش کلی آنالیز
Furfuryl alcohol	DFG Method No. 3,Vol. 8	Tenax TA	GC
Styrene	DFG Method No. 3,Vol. 5	Tenax TA	GC
Chlorinated biphenyls (PCBs)	DFG Method No. 2,Vol.8	Tenax TA	GC-MS
Dicyclopentadiene	DFG Method No. 1,Vol. 9	Chromosorb 106	GC-MS
Halogenated anesthetics	DFG Method No. 2,Vol. 9	XAD-4	GC
Nitrous oxide	DFG Method No. 3,Vol. 9	Molecular sieve 5Å	GC-ECD

امتیازات نمونه‌برداری با استفاده از لوله‌های جاذب و واجذب حرارتی

۱- نمونه‌برداری و آنالیز با این روش برای تعداد بسیاری از ترکیبات مختلف قابل استفاده است

۲- حد آشکارسازی ترکیبات با این روش تا ۱۰۰۰ مرتبه بیشتر از روش‌های نمونه‌برداری است که به‌صورت شیمیایی واجذب می‌شود.

۳- در این روش نیاز به حلال‌های خطرناک نمی‌باشد.

۴- لوله‌های نمونه‌برداری در این روش می‌تواند تا حداکثر ۱۰۰ مرتبه برای نمونه‌برداری مجدد بعد از شستشوی حرارتی استفاده شوند.

با توجّه به حساسیت فوق‌العاده روش نمونه‌برداری با لوله‌های جاذب و واجذب حرارتی، این روش در مطالعات سم‌شناسی مورد استفاده قرار گرفته است. در یک مطالعه، از این روش نمونه‌برداری برای ترکیب پنتان به‌عنوان بیومارکر پراکسیداسیون لیپیدی در هوای بازدم کارکنان شیشه‌گر با مواجهه قابل‌ملاحظه با دی‌اکسید ازت و همچنین کارکنان سیگاری در دو مطالعه مختلف استفاده شد. این مطالعه قابلیت اندازه‌گیری پنتان در هوای بازدم در تراکم‌های ۱۵ pmol/l و بیشتر را به‌طور مؤثر نهادینه کرد.

نقاط ضعف نمونه‌برداری با استفاده از لوله‌های جاذب و واجذب حرارتی

۱- آنالیز نمونه‌ها در این روش فقط یکبار امکان‌پذیر است.

۲- کاربرد این روش نیازمند به سرمایه‌گذاری قابل‌ملاحظه برای خرید دستگاه حرارتی جهت واجذب نمونه‌ها است.

۳- لوله‌های جاذب ساخته شده توسط کمپانی‌های مختلف نمی‌توانند در هر دستگاه واجذب حرارتی مورد استفاده قرار گیرند.

لوله‌های نمونه‌بردار عمدتاً در اندازه (mm 89×3.6) توسط کمپانی‌هایی مانند Shimadzu ،PerkinElmer، Gerstel ،Teledyne و Tekmar ساخته می‌شوند. علاوه بر این، این نمونه‌بردارها می‌توانند در آزمایشگاه توسط کارشناسان خبره و با استفاده از مواد جاذب مختلف ساخته شوند که این روش از نظر هزینه بسیار ارزان‌تر است.

۵-۱-۴-۱-۳) نمونه‌برداری با لوله‌های جاذب و مشتق‌سازی ترکیبات به‌طور همزمان

استخراج شیمیایی لوله‌های جاذب معمولاً با استفاده از حلال انجام می‌شود، اما بسیاری از مواد از نظر شیمیایی ناپایدار هستند و نمی‌توان آنها را در شکل و فرم اصلی ترکیب برای مدت زمان طولانی حمل یا نگهداری کرد. در این صورت، چندین روش برای تثبیت این ترکیبات در هنگام حمل و نقل و نگهداری مناسب نمونه‌ها وجود دارد که به شرح زیر ارائه می‌شود:

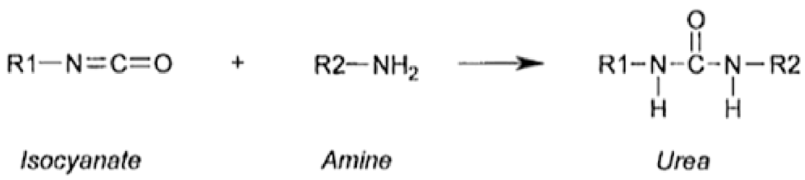
ترکیبات واکنش‌زا، مانند ایزوسیانات‌ها یا آلدئیدها، در هنگام نمونه‌برداری به اشکال شیمیایی پایدارتر مشتق‌سازی می‌شوند که به‌طور قابل توجّهی مدت زمان نگهداری نمونه‌ها را قبل از آنالیز افزایش می‌دهد. علاوه بر مشتق‌سازی، ترکیبات نمونه‌برداری شده باید مطابق با دستور روش استاندارد تحت شرایط برودت به آزمایشگاه ارسال شوند و در آزمایشگاه تا زمان آنالیز در یخچال یا فریزر در دمای مناسب نگهداری گردند. در این روش‌های نمونه‌برداری، ترکیبات هوا که در لوله‌های جاذب مشتق‌سازی می‌شوند، باید الزامات زیر را داشته باشند:

الف) ترکیب شیمیایی واکنش‌زا (به‌عنوان مثال دی‌ایزوسیانات‌ها) باید با واکنش با یک ترکیب شیمیایی مشتق‌سازی و به ترکیب‌های پایدار مبدل شوند.

ب) واکنش نمونه‌ها با مواد شیمیایی در لوله‌های جاذب در زمان نمونه‌برداری باید به‌گونه‌ای باشد که امکان واجذب مناسب ترکیب مشتق‌سازی شده در هنگام آماده‌سازی برای آنالیز فراهم گردد (به‌عنوان مثال، آلدئیدها، آمونیاک، هیدرازین، آمین‌ها).

ج) واکنش ترکیب اصلی با مواد شیمیایی لوله جاذب باید عامل حساسیت بهتر ترکیب هنگام آنالیز باشد (به‌عنوان مثال اپوکسیدها).

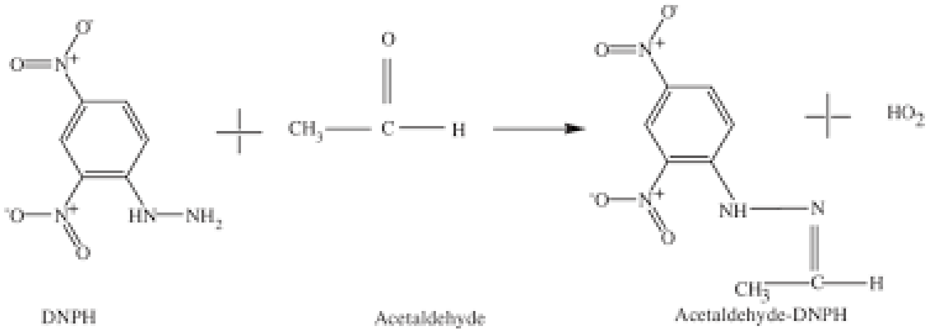
د) لازم به‌ذکر است که نمونه‌برداری از ترکیبات شیمیایی واکنش‌زا با سایر ترکیبات می‌تواند آنالیز نمونه را با مشکل روبه‌رو کند، اما مشتق‌سازی آن در مرحله نمونه‌برداری، عامل ثبات ترکیب می‌شود (به‌عنوان مثال، دی‌ایزوسیانات‌ها در نمونه‌برداری با ترکیب tryptamine مشتق‌سازی شده و به یکی از ترکیبات پایدار اوره[1] برای آنالیز تبدیل می‌شود).



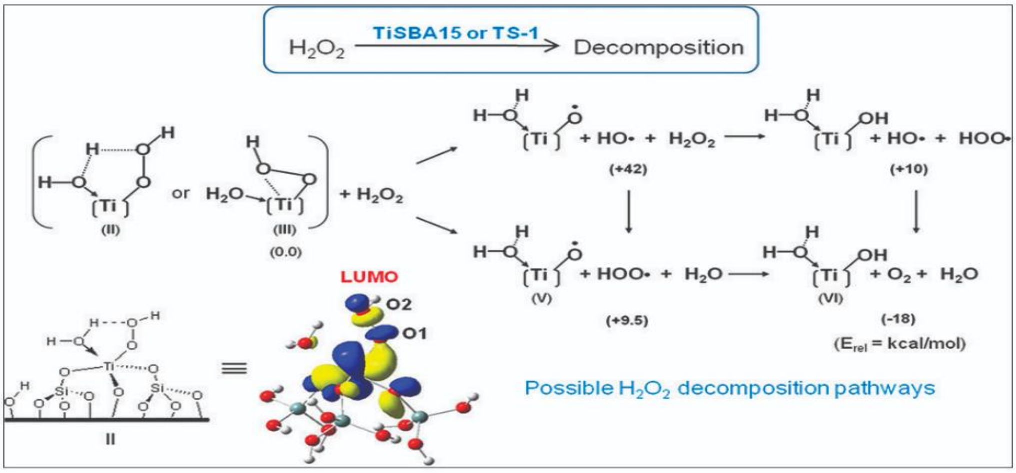
شکل ۱۲-۵) استفاده از ترکیب Tryptamine برای مشتق‌سازی ترکیب ایزوسیانید

مثالی از این نوع، نمونه‌برداری از آلدئیدها با استفاده از معرف dinitrophenylhydrazine برای مشتق‌سازی است و یا برای نمونه‌برداری از دی‌ایزوسیانات‌ها از فیلترهای آغشته به 2-methoxyphenyl-piperazine استفاده می‌شود. به‌همین ترتیب، برای پایدار کردن ترکیب پراکسید هیدروژن نیز از محلول‌های حاوی تیتانیوم استفاده می‌شود.

[1] Urea



شکل ۱۳-۵) استفاده از ترکیب 2,4-Dinitrophenylhydrazine برای مشتق‌سازی Acetaldehyde

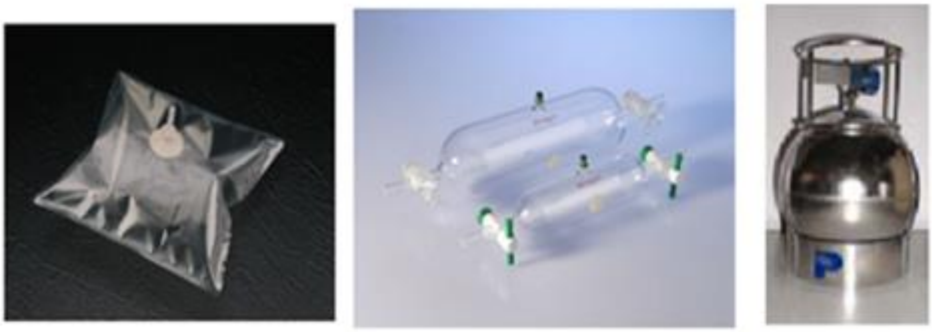


شکل ۱۴-۵) استفاده از ترکیب هیدرات تیتانیوم برای مشتق‌سازی ترکیب هیدروژن پراکسید

۵-۱-۵)   نمونه‌برداری از گازها و بخارات توسط کیسه‌های تدلار

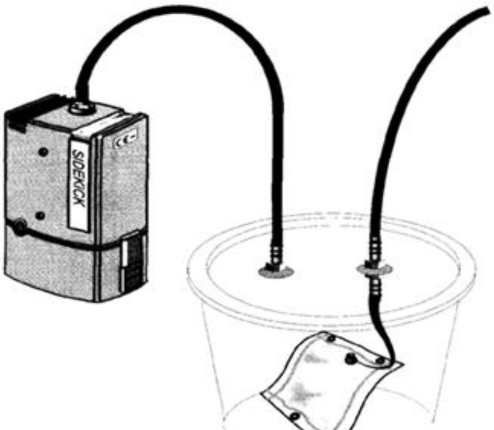
آزمایشگاه OSHA در مرکز ایالت اورگان کیسه‌های نمونه‌برداری هوای تدلار[1] را، همان‌طور که در شکل ۱۵-۵ نشان داده شده است، برای جمع‌آوری نمونه‌های هوای با حجم قابل‌ملاحظه ارائه می‌کند. در هنگام نمونه‌برداری، می‌توان کیسه‌های تدلار را تا ۷۵٪ حجم اسمی پر نمود و پس از آن باید شیر وسیله نمونه‌بردار بسته شود.

[1] Tedlar Bag



شکل ۱۵-۵) کیسه‌های تدلار، ظرف شیشه‌ای مجهز به شیرهای قطع و وصل و قوطی‌های مخصوص

کیسه‌های Tedlar مجهز به شیرهای ورودی و خروجی از جنس PTFE هستند. این کیسه‌ها برای نمونه‌برداری از گازها، ترکیبات آلی در هوای محیط و همچنین ساخت استانداردهای اتمسفریک برای مطالعات علمی مورد استفاده قرار می‌گیرند. جنس Tedlar ویژگی‌های منحصر به‌فردی دارد؛ به‌طوری که مواد شیمیایی در سطح داخلی آن جذب نمی‌شود، واکنش با ترکیبات شیمیایی نمی‌دهد و مواد شیمیایی در هوا نمی‌توانند در شرایط متعارف از جداره آن خارج شوند. کیسه‌های نمونه‌برداری در اندازه‌های مختلف از ۱ الی ۱۰۰ لیتر موجود هستند و برای نمونه‌برداری از هوای محیط طبق شکل ۱۶-۵ استفاده می‌شوند. برای نمونه‌برداری، کیسه تدلار در یک ظرف بسته قرار می‌گیرد و با استفاده از لوله‌های رابط به یک پمپ متصل می‌شود. با تخلیه هوای درون ظرف و ایجاد اختلاف فشار با محیط بیرون، جریان هوای محیط به درون کیسه جاری شده و در نهایت کیسه پر می‌شود.



شکل ۱۶-۵) نحوه نمونه‌برداری هوا با استفاده از کیسه تدلار

جمع‌آوری نمونه برای آنالیز از طریق مخازن و کیسه مخصوص

در شرایطی که متراکم‌سازی نمونه‌ها برای آنالیز لازم نباشد، نمونه‌ها در مخازن ویژه و کیسه‌های تدلار جمع‌آوری می‌شوند. مخازن و کیسه‌های جمع‌آوری نمونه‌های هوا در اندازه‌های مختلف موجود هستند و در مورد نمونه‌برداری توسط کیسه‌های تدلار، هوا با هواگذر ۱ تا ۳ لیتر در دقیقه در کیسه‌ها کشیده می‌شود. لازم به یادآوری است که کیسه‌ها و مخازن نمونه‌برداری قبل از نمونه‌برداری باید با هوای تمیز شسته شوند و این شستشو باید با حجم هوای حداقل چهار برابر حجم نمونه‌بردار انجام شود.

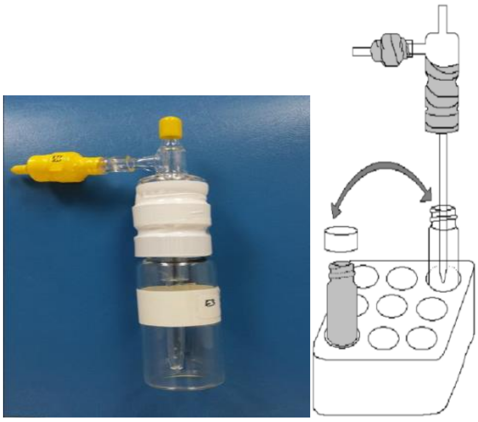
۵–۱–۶) نمونه‌برداری از گازها و بخارات توسط ایمپینجر

در برخی موارد، ایمپینجرها برای نمونه‌برداری استفاده می‌شوند و در این زمینه نمونه‌بردارهای جدیدی با مواد جاذب مایع توسعه یافته‌اند. در حال حاضر نمونه‌برداری با استفاده از ایمپینجر برای تعدادی از ترکیبات به‌شرح جدول زیر استفاده می‌شود (جدول ۵–۵).

جدول ۵–۵) ترکیبات قابل نمونه‌برداری توسط ایمپینجر

نام ترکیب	شماره CAS ترکیب
Alkyl dimethyl benzyl ammonium chloride	139-08-2
Benzyl cetyl dimethyl ammonium chloride	122-18-9
Chlorine Dioxide	10049-04-4
Cyanide	57-12-5
HDI (Hexamethylene diisocyanate)	822-06-0
HDI-BT (Biruet Trimer of HDI)	4035-89-6
HDI-IC (Isocyanurate of HDI)	3779-63-3
IPDI (Isophorone diisocyante)	4098-71-9
MDI (Methylene diphenyl diisocyanate)	101-68-8
TDI (Toluene diisocyanate	584-84-9
Hexamethylenetetramine	100-97-0
Hydrogen cyanide	57-12-5
Hydrogen Peroxide	7722-84-1
MEK Peroxide	1338-23-4
MOCA	101-14-4

شکل ۱۷-۵ یک ایمپینجر میدجت (پایه کوتاه) را نشان می‌دهد که علاوه بر مزیت اندازه کوچک و سهولت حمل، این نمونه‌بردار مجهز به قطعه خاصی است که سرعت جریان هوای نمونه‌برداری را برای برخورد ترکیبات هوابرد با مایع افزایش می‌دهد. این طراحی باعث می‌شود که ترکیبات مرطوب‌شده بهتر در مایعات ایمپینجر جذب شوند.



شکل ۱۷-۵) ایمپینجر پایه کوتاه

ملاحظات لازم برای کاربرد ایمپینجرها:

مشخصات نمونه‌برداری باید بر روی ظرف ایمپینجر ذکر شده و اقدامات لازم برای محافظت از نمونه‌بردار در برابر آسیب‌های احتمالی انجام شود. کاربرد ایمپینجر باید همراه با اضافه کردن مایعات مناسب برای نمونه‌برداری از ترکیبات شیمیایی مورد نظر طبق مراحل زیر باشد:

۱- قبل از نمونه‌برداری، قسمت بالایی نمونه‌بردار باید باز شده و محلول لازم برای نمونه‌برداری در ویال نمونه‌بردار ریخته شده و سپس ایمپینجر به‌طور صحیح بسته شود.

۲- برای جلوگیری از سرریز مایعات درون ایمپینجر، نباید بیش از ۱۰ میلی‌لیتر از محلول جاذب در ویال نمونه‌بردار اضافه شود. همچنین باید مراقبت شود که نمونه‌بردار چرخیده نشود تا از ریختن مایع روی فیلتر یا ریزش آن از نمونه‌بردار جلوگیری گردد.

۳- حداکثر گذر حجمی در نمونه‌برداری توسط ایمپینجرها ۱ لیتر در دقیقه است که باید طبق روش ارائه شده انتخاب شود.

۴- نمونه‌برداری می‌تواند توسط کارشناسان بهداشت و ایمنی انجام شود یا به یقه کارکنان با گیره مخصوص وصل گردد. در هر صورت باید ترتیبی داده شود که نمونه‌بردار چرخیده نشود تا محتویات آن به فیلتر یا پمپ وارد نشود.

۵- در موارد خاص، مدت زمان نمونه‌برداری باید به‌گونه‌ای تنظیم شود که حجم مایع درون ایمپینجر به کمتر از ۵۰٪ مقدار اولیه نرسد.

۶- پس از نمونه‌برداری، قسمت بالای نمونه‌بردار باید باز شده و درپوش لازم بر روی ویال نمونه‌بردار زده شود.

۵-۱-۷) لوله‌های آشکارساز

برای تعیین میزان گازهای خطرناک و تراکم آن‌ها در هوای محل کار، از لوله‌های آشکارساز استفاده می‌شود. در این روش، ترکیبات با مواد موجود در لوله‌ها واکنش داده و با تغییر رنگ در سطوح لوله، تراکم ترکیب شیمیایی اندازه‌گیری می‌شود. حجم خاصی از هوای محیط به‌درون لوله با پمپ دستی یا مکانیکی کشیده می‌شود.

مزیت این روش در اندازه‌گیری و آنالیز مستقیم و سریع ترکیبات شیمیایی هوای محیط کار است. این روش به‌ویژه برای تعیین تراکم ترکیبات مونوکسید کربن، دی‌اکسید کربن، سولفید هیدروژن، اُزُن، دی‌اکسید نیتروژن، آمونیاک، کلر، فسفین، سیانید هیدروژن و دی‌اکسید گوگرد در هوای محیط کار استفاده می‌شود.

با وجود امتیازهای ویژه این نمونه‌بردار، معایب زیر نیز در این روش وجود دارد:

۱- به‌طور معمول، ویژگی این نمونه‌بردارها برای ترکیبات موجود در هوا محدود است.

۲- محدودیت این نمونه‌بردارها در تعیین غلظت به‌صورت میانگین وزنی زمانی برای مواجهه‌های شغلی در شیفت‌های کاری هشت ساعت و بیشتر است.

۳- واکنش‌های متقابل احتمالی با گازهای شیمیایی که همزمان در این نمونه‌برداری‌ها وجود دارد.

۴- اشکال در خواندن ارتفاع تغییر رنگ به‌عنوان شاخص تراکم در لوله‌های نمونه‌بردار گزارش شده است.

۵-۱-۸) دستگاه‌های قرائت مستقیم برای نمونه‌برداری از گازها و بخارات

دستگاه‌های قرائت مستقیم می‌توانند به‌صورت انتخابی برای یک ماده خاص (مثلاً مونوکسید کربن) یا به‌طور غیرانتخابی برای مخلوطی از مواد (مثلاً بخارهای حلال) به‌کار گرفته شوند.

این دستگاه‌ها برای کاربردهای مختلفی از جمله هشداردهی تراکم ترکیبات در حد غیرمجاز از طریق صدا یا نور افکنی و بدون نمایش کمیّت تراکم ترکیب در هوای محیط مورد استفاده قرار می‌گیرند. دستگاه‌های قرائت مستقیم نسبتاً ارزان و به آسانی قابل استفاده هستند. نسل‌های جدیدتر این دستگاه‌ها علاوه بر انجام علائم هشدار، قابلیت ثبت تراکم ترکیبات در یک دوره زمانی را نیز دارند و از این رو می‌توانند تراکم ترکیبات را به‌صورت وزن‌یافته زمانی ثبت نمایند. به همین دلیل، سیستم مذکور قادر است میزان تراکم محیطی ترکیبات را در شیفت کاری و تراکم کوتاه‌مدت نشان دهد.

توضیحات دستگاه‌های قرائت مستقیم با مکانیسم‌های متفاوت به‌شرح زیر ارائه می‌شوند:

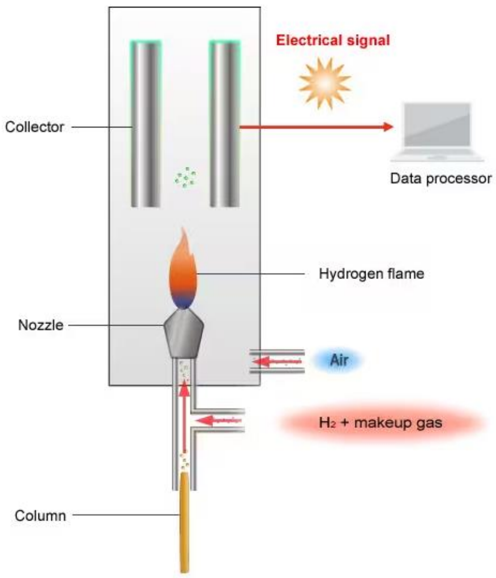


شکل ۱۸-۵) یک دستگاه قرائت مستقیم قابل حمل توسط پرسنل

۵-۱-۸-۱) دستگاه قرائت مستقیم مجهز به آشکارساز شعله یونیزه کننده

آشکارساز شعله یونیزه کننده (FID)[1] را می‌توان برای تعیین مجموعه‌ای از مواد قابل اشتعال استفاده نمود. گازها و بخارات موجود در هوای محل کار با یک پمپ به داخل سیستم کشیده می‌شوند و سپس وارد محفظه احتراق می‌شوند. ترکیبات آلی در حرارت زیاد یونیزه شده و یک جریان الکتریسیته را متناسب با غلظت ترکیب نمونه‌برداری شده در الکترودهای آشکارساز برقرار می‌کند.

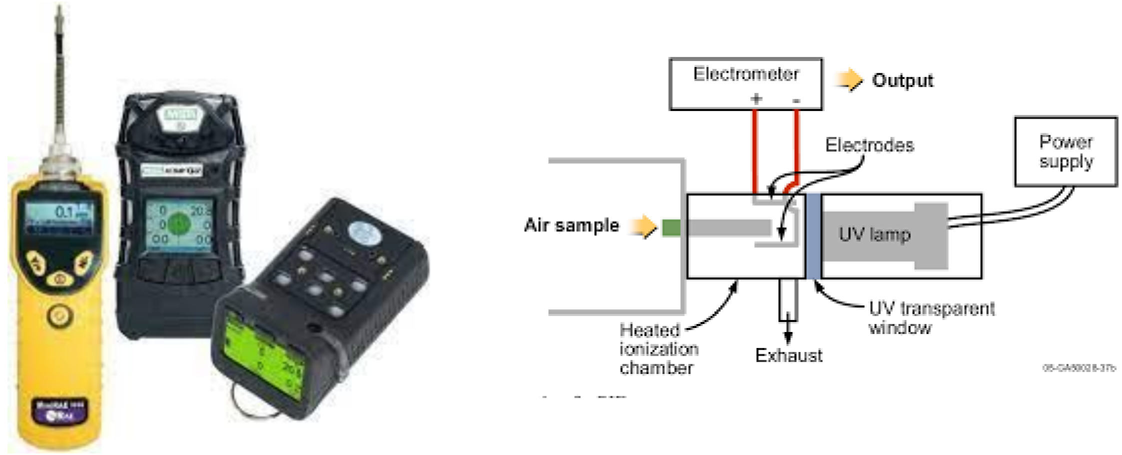
به دلیل ابعاد دستگاه قرائت مستقیم، این سیستم برای نمونه‌برداری فردی از منطقه تنفسی هوای کارکنان مناسب نیست. مزیت این سیستم نشان دادن تراکم ترکیبات آلی در طول زمان و ثبت پیک‌های تراکم گازها و بخارات است. از نقاط ضعف این سیستم می‌توان به نبود ویژگی مطلوب آنالیز و حساسیت آنالیز اشاره کرد که مقایسه با استانداردهای حد تماس شغلی را غیرممکن می‌سازد. دامنه اندازه‌گیری تراکم ترکیبات آلی حداکثر از قسمت در میلیون (ppm) تا درصد، متغیر است.





شکل ۱۹-۵) ساختار دستگاه قرائت مستقیم آشکارساز FID

[1] Flame Ionization Detector



شکل ۲۰-۵) ساختار دستگاه قرائت مستقیم PID

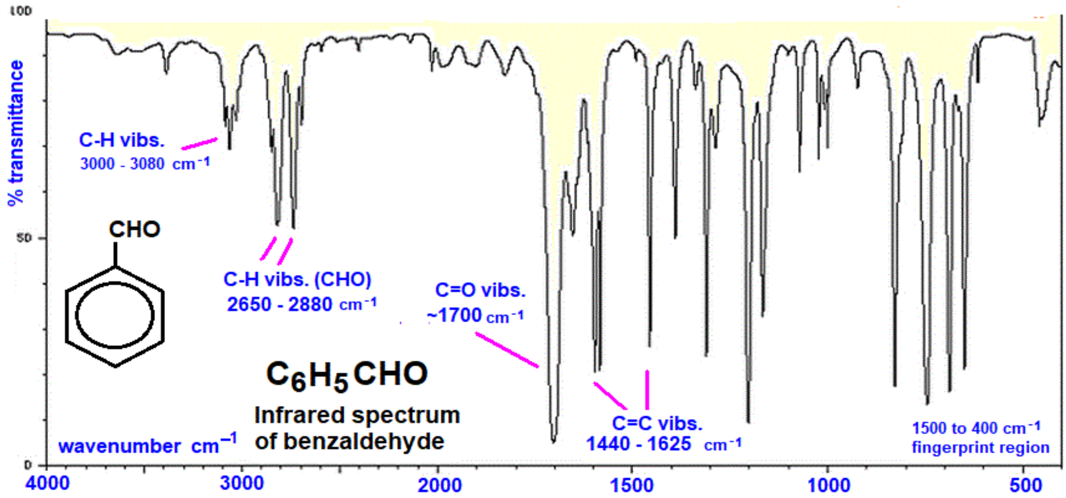
۵-۱-۸-۲) دستگاه قرائت مستقیم مجهز با آشکارساز فتویونیزاسیون

در دستگاه قرائت مستقیم دارای آشکارساز فتویونیزاسیون[1]، هوا توسط یک پمپ داخلی به آشکارساز فوتویونیزاسیون کشیده می‌شود و از روی یک لامپ ویژه (معمولاً لامپ UV) عبور می‌کند. یونیزاسیون ماده مورد نظر در شرایطی اتفاق می‌افتد که پتانسیل یونیزاسیون آن کمتر از انرژی تابش لامپ باشد. آشکارساز PID با توجّه به نوع ترکیب و تراکم آن، سیگنال ایجاد شده توسط ترکیب یونیزه شده را اندازه‌گیری می‌نماید. ویژگی آشکارساز بر اساس نوع لامپ متغیر است.

دستگاه PID کوچک و قابل حمل است و با نیروی باتری کار می‌کند و در شرایط خاصی می‌تواند برای نمونه‌برداری فردی مورد استفاده قرار گیرد. قدرت تشخیص ترکیبات از یکدیگر یک امتیاز ویژه این دستگاه است که امکان شناسایی تراکم ترکیب در شرایط زمانی و به‌خصوص زمان‌های پیک را فراهم می‌کند. ترکیباتی که از طریق این دستگاه می‌توانند اندازه‌گیری شوند عبارتند از: ترکیبات حلقوی[2]، هیدروکربورها با شاخه کلرور[3]، آمین‌ها[4]، اکسید ترکیبات آلی و گازهای معدنی از قبیل آمونیاک[5] و دی‌هیدروژن سولفید[6].

[1] Photo Ionization Detector
[2] Aromatic Hydrocarbons
[3] Chlorinated Hydrocarbons
[4] Amines
[5] Ammonia
[6] Dihydrogen sulfide

با این حال، از آنجایی که ویژگی این سیستم برای هر ترکیب به لحاظ حضور ترکیبات دیگر محدود است، مقایسه داده‌های این سیستم با استانداردهای حد مجاز تماس شغلی می‌تواند مسئله‌ساز باشد. دستگاه‌های PID برای تراکم‌های زیادتر از ppb ($\mu L/m^3$) و بیشتر ppm (mL/m^3) استفاده می‌شود.



شکل ۲۱-۵) طیف جذب گروه‌های عاملی در طول موج‌های مختلف IR

۵-۱-۸-۳) دستگاه قرائت مستقیم از طریق طیف‌سنجی مادون قرمز

طیف‌سنجی مادون قرمز می‌تواند برای تعیین کمّی و کیفی گازها و بخارات جذب‌کننده پرتو IR استفاده شود. در این روش، هوا از طریق یک پمپ موجود در دستگاه وارد سیستم می‌شود و اندازه‌گیری ترکیب با توجّه به جذب انرژی تشعشعی IR در طول موج خاص توسط گروه‌های عاملی ترکیبات آلی، شناسایی کیفی خواهد شد. همچنین میزان جذب می‌تواند به‌عنوان پارامتری برای تعیین میزان کمّی ترکیب استفاده شود. جذب انرژی توسط ترکیبات آلی در دامنه طول موج‌های ۲.۵ تا ۱۵ میکرومتر واقع می‌شود و انرژی اشعه IR در طول موج‌های خاصی با توجّه به ساختار مولکولی ترکیبات باعث القای برانگیختگی در پیوست‌های بین اتم‌های ترکیبات می‌گردد.

ز آنجایی که جذب انرژی در طول موج‌های خاصی انجام می‌پذیرد، پیش‌شرط اندازه‌گیری صحیح این است که هیچ ترکیب دیگری در دامنه جذب طول موج‌های ترکیب مورد نظر تداخل ایجاد نکند. انتخاب صحیح

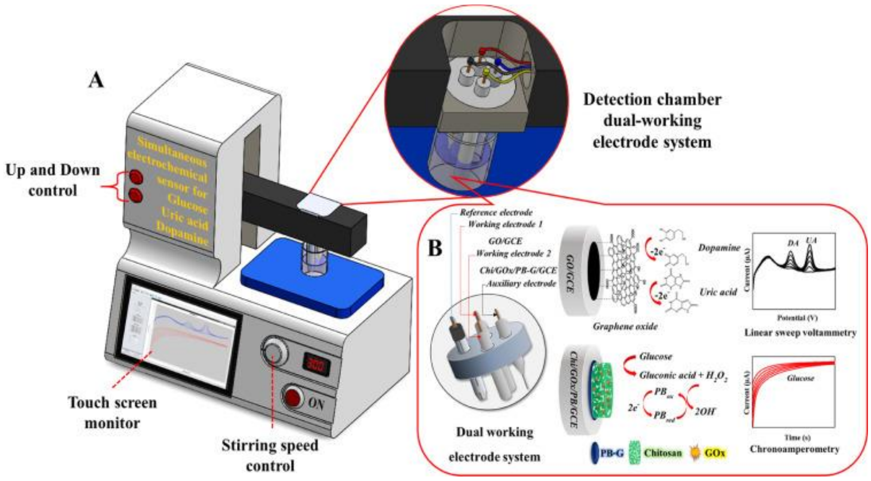
طول موج‌هایی که توسط ترکیب جذب می‌شوند، به آنالیز دقیق‌تر ترکیب مورد نظر در این روش کمک می‌نماید. حساسیت این روش در اندازه‌گیری تراکم ترکیبات در میزان کمتر از قسمت در میلیون (mL/m^3) ppm می‌باشد. کاربرد دستگاه طیف‌سنج IR، با توجّه به ابعاد بزرگ آن، برای نمونه‌برداری و آنالیز همزمان هوای تنفسی کارکنان امکان‌پذیر نیست. همچنین، زمان پاسخ‌دهی دستگاه IR نسبت به دستگاه‌های PID و FID بیشتر است.

در دهه‌های اخیر، سیستم‌های پیشرفته دستگاه طیف‌سنجی مادون قرمز به‌صورت FTIR معرفی شده‌اند که به‌ویژه امکان آنالیز بخارات حلال‌ها را به‌صورت چندین ماده و به‌طور همزمان فراهم می‌کنند. این روش به شناسایی ترکیبات مختلف موجود در هوای محل کار کمک می‌کند و در شرایط خاص مستلزم آن است که مداخله‌گرهای شناخته شده برای ترکیبات مورد نظر وجود نداشته باشند تا دقت آنالیز حفظ شود.

۵–۱–۸–۴)   دستگاه‌های قرائت مستقیم دارای حسگرهای گازی الکتروشیمیایی

از حسگرهای گازی الکتروشیمیایی[1] می‌توان برای تعیین کیفیت و کمّیت گازها و بخارات محیط کار و با هدف پایش فردی استفاده نمود. گازها و بخارات محیط کار توسط یک پمپ به درون این سیستم کشیده می‌شوند و سپس از یک غشای نفوذپذیر گاز عبور می‌کنند و به الکترولیت حسگر سیستم می‌رسند. در محفظه حسگر، اختلاف پتانسیل جریان الکتریسیته بین دو الکترود بستگی به نوع ترکیب خواهد داشت که پس از اکسیداسیون یا احیای ترکیب، اندازه‌گیری می‌شود.

[1] Electrochemical Sensor



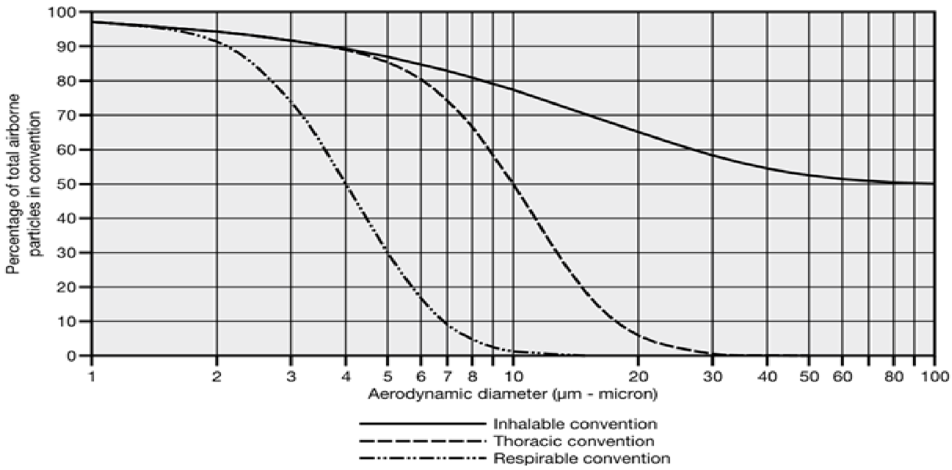
شکل ۲۲-۵) نحوه عملکرد آشکارساز الکتروشیمیایی

حسگرهای الکتروشیمیایی اغلب به‌عنوان دستگاه‌های هشداردهنده برای وجود ترکیبات در هوای محیط استفاده می‌شوند. در این سیستم‌ها، امکان ثبت زمان و تغییرات وابسته به غلظت مواد خطرناک در هوا (مانند کلر، کربن مونوکسید، سولفید هیدروژن، فرمالدئید، آمونیاک، سیانید هیدروژن، اتیلن اکسید یا وینیل کلرید) وجود دارد. محدوده اندازه‌گیری در این سیستم معمولاً در سطوح بیشتر از ppb امکان‌پذیر است. طول عمر دستگاه‌های اندازه‌گیری الکتروشیمیایی به دلیل انقضای حسگرهای آن محدود است. زمان واکنش این حسگرها در مقایسه با FID و PID کندتر است.

۵-۱-۹) نمونه‌برداری از آئروسل‌های هوا

آئروسل‌های هوای محیط شامل گرد و غبار[۱]، دمه[۲]، شبنم[۳] و دوده[۴] است که با توجّه به استاندارد حد آستانه مجاز[۵] برای هر یک از آنها به‌صورت قابل تنفس[۶]، استنشاقی[۷] و قفسه سینه‌ای[۸]، روش نمونه‌برداری و هد نمونه‌بردار به اشکال مختلف انتخاب می‌شود.

[1] Dusts
[2] Fume
[3] Mists
[4] Smoke
[5] Occupational Exposure Limit
[6] Inhalable
[7] Respirable
[8] Thoracic



شکل ۲۳-۵) درصد ته‌نشینی ذرات در سیستم ریوی بر اساس قطر معادل آئرودینامیکی آن

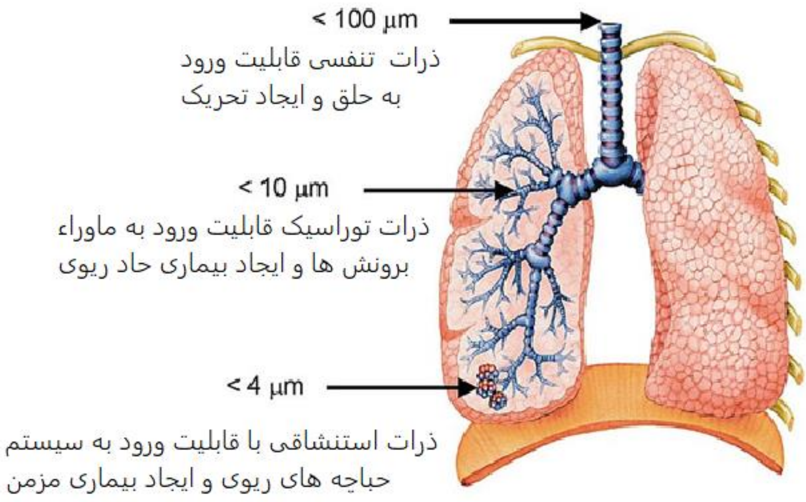
۵-۱-۹-۱) طبقه‌بندی آئروسل‌ها بر حسب قطر معادل آئرودینامیکی

اصول نمونه‌برداری از ذرات بر اساس استاندارد سازمان ISO و قابلیت نفوذپذیری ذرات در سیستم ریوی با توجّه به قطر معادل آئرودینامیکی ذرات در سه بخش به‌شرح زیر تعریف شده‌اند (شکل ۲۴-۵):

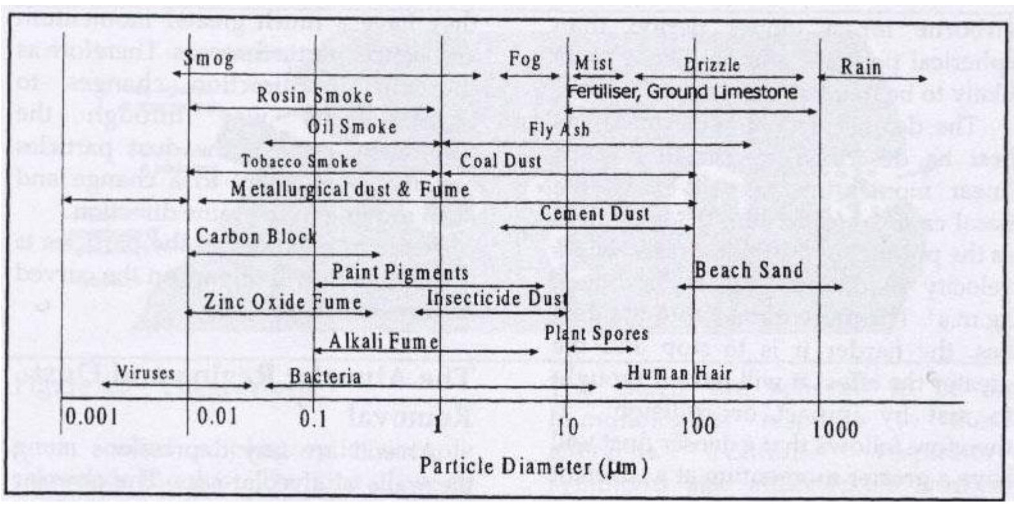
۱- ذرات تنفسی (Inhalable fraction): معمولاً شامل ذراتی با قطر کمتر از ۱۰۰ میکرون است که می‌توانند وارد قسمت فوقانی دستگاه تنفسی (دهان و بینی) شوند.

۲- ذرات توراسیک (Thoracic fraction): ذراتی با قطر کمتر از ۵۰ میکرون و میزان نفوذپذیری ۵۰٪ یا به اندازه ۱۰ میکرون، قادرند به قسمت‌های میانی دستگاه تنفسی برسند.

۳- ذرات استنشاقی (Respirable fraction): تمام ذراتی که قطر آنها کمتر از ۱۶ میکرون است و میزان نفوذپذیری ۵۰٪ یا به اندازه ۴ میکرون دارند، می‌توانند به حبابچه‌های ریوی نفوذ کنند.



شکل ۲۴-۵) قابلیت ورود ذرات بر اسا قطر معادل آئرودینامیکی در بخش‌های حلق، قسمت توراسیک (میانی) و حباچه‌های ریوی



شکل ۲۵-۵) اندازه اقسام اجسام ذره‌ای هوابرد با توجّه اندازه آنها بر حسب میکرومتر

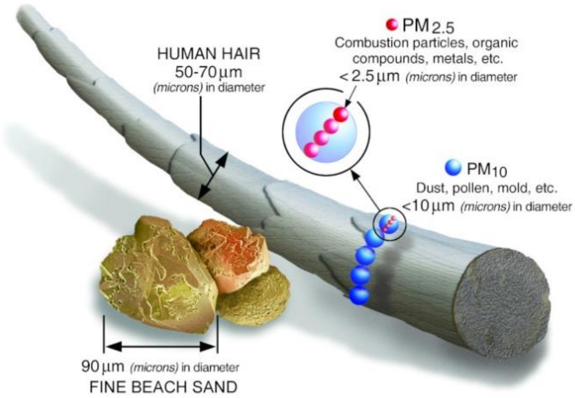
اقسام مختلف اجسام ذره‌ای به‌شرح زیر نام‌گذاری می‌شوند:

۱- ذرات هوابرد گرد و غبار (Dust): بدون اشاره به ماهیت شیمیایی آن‌ها، اغلب به‌عنوان آئروسل یا گرد و غبار نامیده می‌شوند و اندازه تقریبی آن‌ها در دامنه ۰.۱ تا ۱۰۰ میکرون (µm) قرار دارد.

۲- ذرات هوابرد دمه (Fume): در حرارت‌های بالا، مواد جامد به گاز تبدیل شده و پس از سرد شدن و متراکم شدن، به ذرات جامد هوابرد تبدیل می‌شوند که معمولاً اندازه‌ای کمتر از ۱ میکرون (µm) دارند.

۳- ذرات هوابرد شبنم (Mists): در هنگام حرارت‌دهی، مایعات به گاز تبدیل شده و پس از سرد شدن و متراکم شدن، به ذرات هوابرد مایع تبدیل می‌گردند که معمولاً اندازه‌ای کمتر از ۱ میکرون (µm) دارند.

۴- ذرات هوابرد لیف (Fiber): اجسام ذره‌ای رشته‌ای شکل با نسبت طول به عرض بیشتر از ۳ و طول بیشتر از ۵ میکرون (µm) تعریف شده‌اند.



شکل ۲۶-۵) تصویر گرافیکی مقایسه اجسام هوابرد فیبری و ذره‌ای

با توجّه به اهمیت اندازه ذرات در ظرفیت نفوذپذیری آنها در بخش‌های مختلف سیستم ریوی، نمونه‌برداری از اجسام ذره‌ای هوابرد در سه بخش قابل استنشاق (Inhalable)، قابل ورود به قفسه سینه (Thoracic) و قابل نفوذ به قسمت‌های تحتانی سیستم تنفسی (Respirable) با روش‌ها و وسایلی به‌شرح زیر انجام می‌شود.

۵-۱-۹-۲) تجهیزات نمونه‌برداری از آئروسل‌ها

۵-۱-۹-۲-۱) پمپ‌های نمونه‌برداری فردی

پمپ‌های متعددی در بازار موجود هستند که اکثراً دارای باطری قابل شارژ می‌باشند. این پمپ‌ها باید قابلیت حمل توسط فرد نمونه‌بردار را داشته باشند. پمپ‌ها توانایی تولید مکش در میزان گذر حجمی ۰.۵ تا ۵ لیتر در دقیقه را دارند و بیشتر نمونه‌برداری‌ها از اجسام ذره‌ای هوابرد نیازمند گذر حجمی ۱ تا ۳.۵ لیتر در دقیقه هستند (با توجّه به هد نمونه‌بردار به‌شکل‌های مختلف مانند IOM و سیکلون‌ها) و باید مطابق با توصیه سازندگان مورد استفاده قرار گیرند.

معمول‌ترین نوع پمپ مورد استفاده در چند دهه گذشته پمپ‌های شرکت SKC بوده‌اند و لازم به ذکر است که در سال‌های اخیر این پمپ‌ها توسط مهندسین ایرانی نیز ساخته شده‌اند. به‌طور کلی، امکانات پمپ‌ها علاوه بر ایجاد مکش لازم، شامل قابلیت کنترل جریان هوا به‌صورت ثابت، توانایی ایجاد فشار برای جبران افت فشار در اثر نمونه‌برداری از ذرات هوابرد، ایجاد گذر حجمی مناسب، ظرفیت مطلوب شارژ باتری برای نمونه‌برداری‌ها در مدت زمان شیفت کاری پرسنل و تأمین ایمنی ذاتی برای اماکن با قابلیت انفجار می‌باشد.

۵-۱-۹-۲-۲) موضوعات رایج در خصوص استفاده از پمپ‌های نمونه‌برداری

۱- **لزوم شارژ شدن پمپ‌ها به میزان مناسب و قبل از نمونه‌برداری به‌منظور دستیابی به عملکرد مطلوب پمپ برای حداقل یک شیفت کاری هشت ساعته**

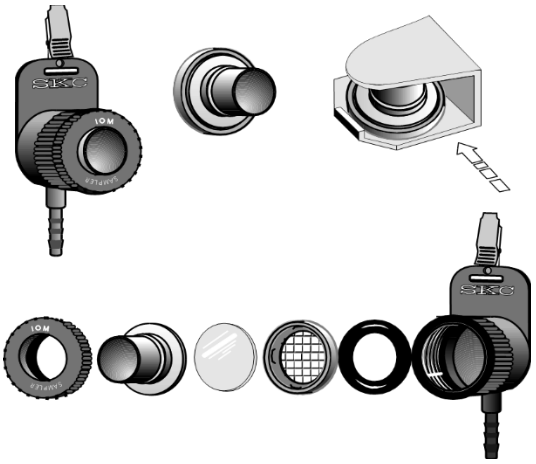
۲- **نگهداری پمپ‌ها و تعویض به موقع دیافرگم و باطری**

۳- **دقیق نبودن گذر حجمی فلومتر پمپ‌ها و لزوم کالیبره کردن آن در محل و با استفاده از نمونه‌بردار در مدار توسط فلومتر حباب صابون**

وسایل نمونه‌برداری از ذرات هوابرد محیط با توجّه به TLV ترکیب مورد نظر و قابلیت مواجهه با آن‌ها به‌صورت تنفسی (Inhalable)، استنشاقی (Respirable) یا توراسیک (Thoracic) به‌شرح زیر انجام می‌شوند:

۵-۱-۹-۲-۳) نمونه‌برداری اجسام ذره‌ای هوا به‌صورت ذرات تنفسی

نمونه‌برداری از ذرات هوابرد تنفسی با هد نمونه‌برداری IOM انجام می‌شود (شکل ۲۷-۵). نمونه‌بردار IOM بهترین هد نمونه‌بردار برای نمونه‌برداری از آئروسل‌های تنفسی است و مراحل کاربرد نمونه‌بردار یادشده به‌شرح زیر است:



شکل ۲۷-۵) ساختار هد نمونه‌بردار IOM

۱- قرار دادن فیلتر ۲۵ mm در کاست هد نمونه‌بردار با کمک انبرک و توسط فردی که دستکش پوشیده است.

۲- فیلتر و کاست به مدت حداقل یک روز در دسیکاتور قرار داده می‌شود تا با حذف رطوبت، وضعیت ثابت وزنی ایجاد شود.

۳- هد نمونه‌بردار به پمپ متصل می‌شود و نمونه‌برداری از آئروسل‌های محیط با گذر حجمی در میزان L/min ۲ و یا بر حسب دستور روش انجام می‌گردد.

۴- پس از نمونه‌برداری، هد نمونه‌بردار باید حداقل به مدت یک روز در دسیکاتور قرار داده شود تا با حذف رطوبت، وضعیت وزنی ثابت ایجاد گردد. سپس، هد با استفاده از ترازوی حساس با دقت ۰.۰۱ میلی‌گرم توزین می‌شود.

۵- ۵- در شرایطی که TLV ترکیبات بسیار کوچک است (برای مثال در نمونه‌برداری از ترکیبات کروم شش ظرفیتی و بریلیوم)، می‌توان از گذر حجمی بیشتر با پمپ‌های قوی محیطی استفاده کرد. لازم به ذکر است که هد نمونه‌بردار IOM مناسب به نام Button Sampler می‌تواند استفاده شود و صافی قرار گرفته بر روی نمونه‌بردار از ورود ذرات درشت غیر تنفسی جلوگیری می‌کند.

*** لازم به‌ذکر است در صورت رعایت به‌کارگیری نمونه شاهد برای کسر وزن رطوبت هوا، کاربرد دسیکاتور می‌تواند حذف شود.**

۵-۱-۹-۲-۴)   نمونه‌برداری از ذرات هوابرد توراسیک

ذرات هوابرد توراسیک قابلیت جایگزینی در مجاری تنفسی و حبابچه‌های ریوی به میزان ۵۰٪ برای ذرات با قطر آئرودینامیکی ۱۰ µm را دارد. گرد و غبار توراسیک برای سه مورد از گرد و غبارهای پنبه، شبنم اسید

سولفوریک و گرد و غبار فلزات سخت کاربید کبالت و تنگستن مطرح شده‌اند که برای نمونه‌برداری از آنها هد نمونه‌بردار توراسیک به‌شرح زیر استفاده می‌شود (شکل ۲۸-۵):

کاربرد هد نمونه‌بردار توراسیک

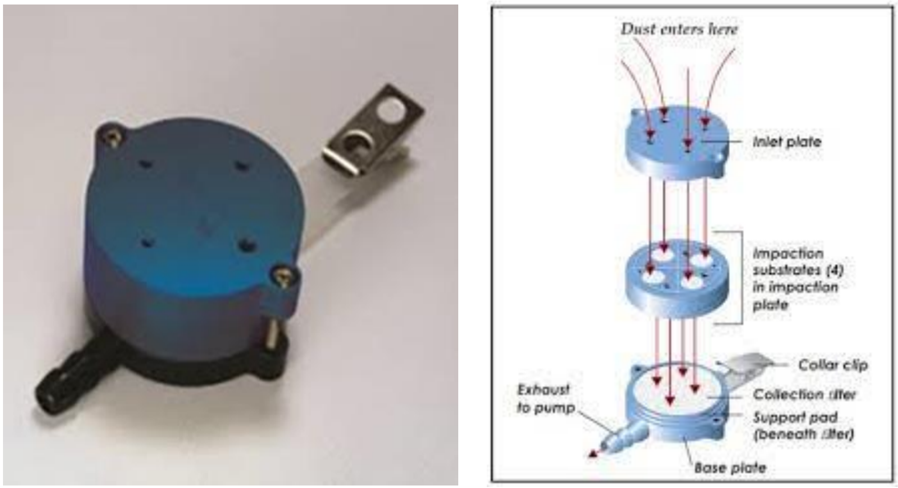
۱- قرار دادن فیلتر ۳۷ mm از نوع PTEF درون هد نمونه‌بردار

۲- تنظیم گذر حجمی هد نمونه‌بردار در میزان ۲ L/min

۳- انتخاب مدت زمان نمونه‌برداری بر اساس پارامترهای TLV ترکیب و دستورات روش‌های مصوب سازمان‌های NIOSH یا OSHA

۴- ۴- نمونه‌برداری از آئروسل‌های توراسیک گرد و غبار پنبه، میست اسید سولفوریک و گرد و غبار فلزات سخت کاربید کبالت و تنگستن به ترتیب با روش‌های استاندارد OSHA Method No.: PV2121، NIOSH Method No. 7908 و NIOSH Method No. 7301 انجام می‌شود. کلیات نمونه‌برداری توراسیک مشابه نمونه‌برداری از آئروسل‌های تنفسی است.

*** لازم به‌ذکر است در صورت رعایت به‌کارگیری نمونه شاهد برای کسر وزن رطوبت هوا، کاربرد دسیکاتور حذف می‌شود.**



شکل ۲۸-۵) ساختار هد توراسیک تشکیل شده از بخش‌های ایمپکتور و فیلتر هولدر

۵-۱-۹-۲-۵)   نمونه‌برداری از ذرات هوابرد استنشاقی

تعریف ذرات هوابرد استنشاقی بر اساس سازمان بین‌المللی ISO 7708 به ذراتی گفته می‌شود که قابلیت نفوذپذیری به قسمت‌های تحتانی حبابچه‌های سیستم ریوی[1] را داشته باشند که معادل ۵۰٪ برای ذرات ۴ µm گزارش شده است.

برای نمونه‌برداری از ذرات هوابرد استنشاقی مراتب به‌شرح زیر می‌بایست رعایت شود:

۱- انتخاب یک سیکلون مناسب و ترجیحاً سیکلون Higgens Dewell ساخت کمپانی SKC (شکل ۲۹-۵)

۲- قرار دادن فیلتر PVC توزین شده در کاست نمونه‌بردار

۳- در نظر گرفتن نمونه شاهد برای هر ست نمونه‌های حقیقی (۱ مورد نمونه شاهد برای هر ده مورد نمونه حقیقی)

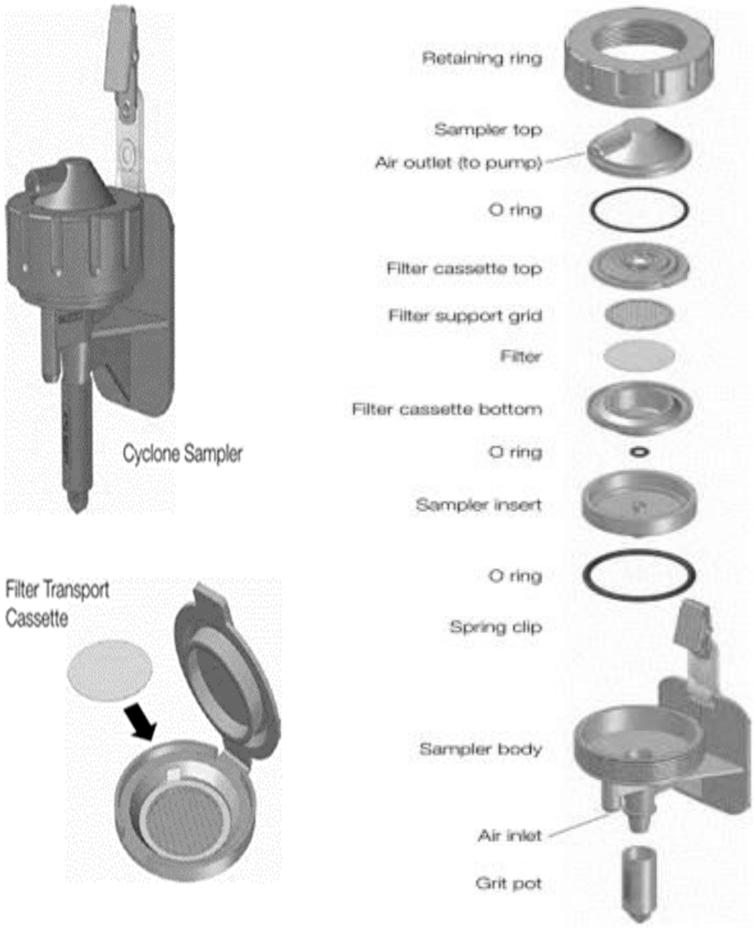
۴- تنظیم گذر حجمی نمونه‌بردار بر اساس دستورالعمل شرکت سازنده (برای مثال ۳ L/min)

۵- نصب نمونه‌بردار بر روی لباس کار در منطقه تنفسی کارکنان به ترتیبی که ورودی جریان هوا از پایین هد نمونه‌بردار به طرف بالا باشد (شکل ۳۰-۵).

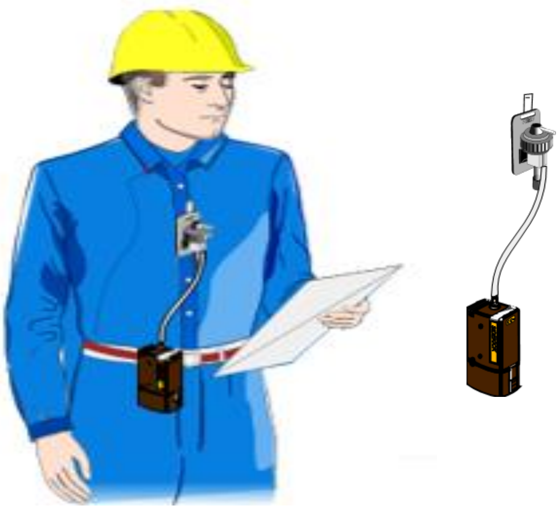
۶- مدت زمان نمونه‌برداری برای ترکیبات دارای مقادیر TLV-TWA ترجیحاً معادل ۴۸۰ دقیقه در نظر گرفته می‌شود. در صورتی‌که انتظار رود که فیلتر نمونه‌بردار در این دوره زمانی بار اضافی بگیرد، مدت زمان می‌تواند کاهش یابد. در این موارد، نمونه‌برداری از چند نوبت کوتاه برای پایش صحیح شغلی فرد توصیه می‌شود. برای آگاهی بیشتر در مورد تعیین مدت زمان نمونه‌برداری، به جدول شماره ۱ مراجعه نمایید.

۷- در پایان زمان نمونه‌برداری، گذر حجمی سیستم نمونه‌برداری ترجیحاً باید معادل میزان اولیه شروع نمونه‌برداری باشد و کاهش آن بیشتر از ۵٪ نباید باشد. در غیر این صورت، دقت نمونه‌برداری کاهش می‌یابد.

[1] Alveolar Sacs



شکل ۲۹-۵) ساختار هد سیکلون برای نمونه‌برداری از ذرات استنشاقی

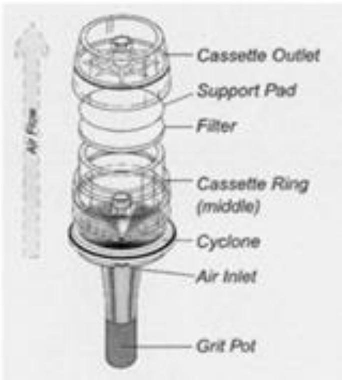


شکل ۳۰-۵) نحوه نصب هد نمونه‌بردار سیکلون بر روی لباس کارکنان

مراتب تکاملی هد نمونه‌بردارهای ذرات هوابرد از دهه هشتاد میلادی به‌شرح زیر است:

۱- موضوع شارژ الکتریسته ساکن و اشکالاتی در مورد چسبیدن ذرات نمونه‌برداری شده به جدار سیکلون گزارش گردید. سپس سیکلون Higgens Dewell از شرکت SKC ارائه شد و در ابتدا نمونه‌برداری با گذر حجمی ۲.۲ L/min توصیه گردید ولی با توجّه به مطالعات سازمان مدیریت بهداشت و ایمنی انگلستان در سال ۲۰۱۸، اعلام گردید گذر حجمی ۲.۲ L/min باعث نتایج غلط یا خطای مثبت می‌شود و از این رو گذر حجمی اصلاح شده بر اساس استاندارد ISO 7708 برای ذرات هوابرد استنشاقی به ۳ L/min تغییر داده شد.

۲- سیکلون آلومینیومی[1] کمپانی SKC که دارای قابلیت حذف شارژ الکتریسته ساکن است جایگزین هد نمونه‌برداری پلاستیکی شد که قبل‌تر مسئله ساز بوده است. این نمونه‌بردار با گذر حجمی ۲.۵ L/min برای نمونه‌برداری از ذرات هوابرد استنشاقی بر اساس استاندارد ISO 7708 به‌کار برده می‌شود.



شکل ۳۱-۵) ساختار سیکلون آلومینیومی

۳- سیکلون GS-3 از کمپانی SKC از جنس مواد پلاستیکی هدایت کننده الکتریسته نیز به دلیل عدم تولید جرقه برای نمونه‌برداری از گرد و غبار استنشاقی معادن ارائه شده است. این نمونه‌بردار با گذر حجمی ۲.۷۵ L/min برای نمونه‌برداری از ذرات هوابرد استنشاقی بر اساس استاندارد ISO 7708 به‌کار برده می‌شود. کمپانی تأکید دارد که ساختار سیکلون‌ها متفاوت از یکدیگر است و عملکرد صحیح آن‌ها برای نمونه‌برداری می‌بایست بر اساس گذر حجمی خاص هر سیکلون تنظیم شود.

[1] Aluminum Cyclone

۵-۱-۹-۲-۶) هد نمونه‌بردار جدید برای نمونه‌برداری از ذرات هوابرد حاصل از سوخت نفت دیزل

نمونه‌بردار جدید برای ذرات هوابرد و نمونه‌برداری از دوده حاصل از سوخت مواد نفتی سنگین مانند نفت دیزل[۱] با اندازه قطر آئرودینامیکی کمتر از ۱ µm به‌کار برده می‌شود. این هد نمونه‌بردار یکبار مصرف است که در بخش تحقیق بر روی معادن سازمان NIOSH طراحی و برای تولید به شرکت SKC داده شد. لازم به‌ذکر است که در وسط این نمونه‌بردار صفحه جدا کننده‌ای[۲] وجود دارد که قادر است گرد و غبار ذغال سنگ را از ذرات دوده قابل استنشاق حاصل از سوخت نفت دیزل جداسازی نماید (شکل ۳۲-۵).



شکل ۳۲-۵) هد نمونه‌بردار دوده سوخت نفت دیزل

۵-۱-۹-۲-۷) نمونه‌برداری از الیاف هوابرد

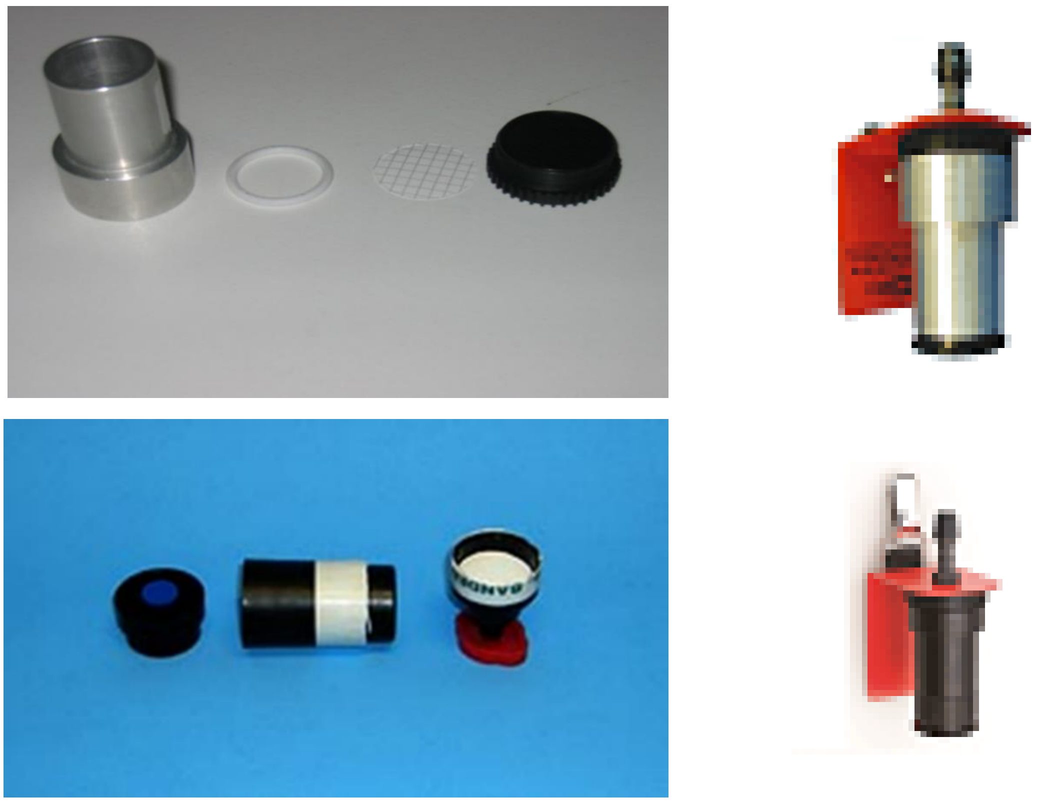
نمونه‌برداری از اجسام لیفی شکل مانند آزبست[۳]، پشم شیشه[۴]، پشم سنگ[۵]، الیاف ساخته شده از شیشه[۶]، الیاف پشم سرباره کوره[۷] و الیاف سرامیکی نسوز[۸]، با استفاده از هد نمونه‌بردار ویژه‌ای به نام هد دالانی از جنس پلاستیکی مخصوص[۹] یا آلومینیومی[۱۰] انجام می‌شود (شکل ۳۳-۵). در این نمونه‌بردار، فیلتر ۲۵ میلی‌متری استرسلولزی با اندازه تخلخل ۰.۸ میکرومتر استفاده می‌شود. کاست فیلتر رسانای الکتریسیته است که به یک استوانه به طول ۵۰ میلی‌متر متصل است. در هنگام نمونه‌برداری، قطعات می‌بایست محکم بسته شوند و

---
[1] Diesel
[2] Impactor Plate
[3] Asbestos
[4] Glass Wool
[5] Rock Wool
[6] Synthetic vitreous
[7] Slag Wool
[8] Refractory Ceramic
[9] Plastic Cowl
[10] Aluminum Cowl

سیستم مکشی کاست نبایستی نشتی داشته باشد. همچنین، در هنگام نمونه‌برداری، سر کاست باید رو به پایین باشد تا خطاهای نمونه‌برداری به حداقل برسد.

نمونه‌برداری با گذر حجمی در محدوده ۰.۵ تا ۵ لیتر در دقیقه انجام می‌شود. لازم به ذکر است که نمونه‌برداری در محیط‌های مختلف با تراکم متفاوت الیاف، متفاوت است. برای مثال، نمونه‌برداری در محیط‌های اداری صنایع درگیر با الیاف با گذر حجمی چند لیتر در دقیقه انجام می‌شود، ولی در محیط‌های صنعتی با تراکم بسیار زیاد الیاف، گذر حجمی به مراتب کمتر (کمتر از ۱ لیتر در دقیقه) برای پیشگیری از بار اضافی نمونه در نظر گرفته می‌شود.

لازم به ذکر است که هنگام نمونه‌برداری باید از ضربه زدن به کاست جلوگیری شود و از قرار دادن ست نمونه‌بردار در مجاورت جریان هوای فشرده اجتناب گردد. همچنین، تعداد نمونه‌های شاهد باید حداقل ۱۰٪ از کل نمونه‌ها در نظر گرفته شود، یا به ازای هر ست از نمونه‌های حقیقی، دو نمونه شاهد مورد نیاز است.



شکل ۳۳-۵) ساختار دو هد نمونه‌بردار برای الیاف هوابرد

۵-۱-۹-۲-۸) نمونه‌برداری از اجسام ذره هوا به‌صورت سیلیس کریستالی

در خیلی از فرایندهای صنعتی از جمله انفجارهای معدن، شن و ساچمه پاشی و فرایندهای برش سنگ و غیره، کارکنان در معرض مواجهه تنفسی با ذرات سیلیس کریستالی[۱] و غیر کریستالی[۲] قرار می‌گیرند. برای ارزشیابی مواجهه کارکنان با ذرات هوابرد سیلیس کریستالی می‌بایست از روش‌های به‌کار رفته برای نمونه‌برداری از ذرات استنشاقی استفاده نمود و نمونه‌ها در مرتبه بعدی به روش تفرق اشعه X و یا طیف‌سنجی IR آنالیز شوند (به فصل ۸ رجوع شود).

۵-۱-۹-۲-۹) نمونه‌برداری از اجسام ذره‌ای هوابرد بدون TLV ، نامحلول و با اثرات سمی کم

در سال‌های اخیر سازمان ACGIH به‌طور مشخص ذرات هوابرد PNOS [۳] را به‌عنوان ذرات نامحلول و یا با محلولیت بسیار کم در آب، فاقد TLV و دارای سمیت کم به‌شرح زیر معرفی می‌نماید.

۱- این ذرات هوابرد دارای TLV نیستند.

۲- ذرات هوابرد، نامحلول یا دارای محلولیت کم در مایعات مخاطی مجاری ریوی هستند. این ویژگی‌ها به لحاظ محدودیت جذب در مجاری تنفسی مورد توجّه قرار گرفته است.

۳- مواد تشکیل دهنده آئروسل‌های PNOS می‌بایست سمیت کمی داشته باشند، بدین ترتیب که ترکیبات جزو مواد دسته‌بندی شده در طبقات سمیت بافت[۴]، سمیت ژنیتیک[۵]، مواد شیمیایی واکنش‌زا[۶] با بافت ریوی و ساطع کننده تشعشعات یونیزان[۷]، ایجاد کننده حساسیت سیستم ایمنی و یا ایجاد کننده اثرات تخریبی غیر از ایجاد التهاب بافت ریوی و یا مکانیسم‌های بار اضافی دادن به ریه نباشند.

۴- سازمان ACGIH اعلام کرده است که ذرات هوابرد PNOS هنوز ممکن است دارای اثرات نامطلوب باشند و از این‌رو تا زمانی که برای آنها TLV تعیین نشده است، توصیه می‌گردد که مواجهه شغلی با ذرات استنشاقی PNOS در کمتر از ۳ mg/m^3 و برای ذرات تنفسی آن در کمتر از ۱۰ mg/m^3 نگهداری شود.

۵- بر اساس یک مقاله در ژورنال .Ann. Occup. Hyg ، ذرات هوابرد PNOS به‌شرح زیر گزارش شده‌اند:

amorphous silica, silicon, silicon carbide, pulverized fuel ash, limestone, gypsum, graphite, aluminium oxide, titanium dioxide

---

[1] Polymorphous Silica
[2] Amorphous Silica
[3] Particles Not Otherwise Specified
[4] Cytotoxic
[5] Genotoxic
[6] Reactive
[7] Ionizing Radiation

۵–۱–۹–۲–۱۰)   نمونه‌برداری از دمه فلزات

نمونه‌برداری از دمه فلزات با کاست سه مرحله‌ای و فیلتر استرسلولزی یا PVC با قطر ۳۷ میلی‌متر و اندازه تخلخل ۰.۸ µm انجام می‌شود (شکل ۳۴-۵).



شکل ۳۴-۵) کاست نمونه‌برداری از دمه فلزات

لازم به ذکر است که اخیراً چندین مقاله جدید در مورد چسبیدن مواد بر روی کاست فیلتر منتشر شده است. به همین دلیل، توصیه شده است که برای پیشگیری از آلودگی نمونه‌ها، کاست فیلترها قبل از نمونه‌برداری شسته شده و به طور کامل پاک شوند و ترجیحاً از فیلتر هولدر IOM به جای کاست فیلترهای معمولی استفاده گردد. همچنین، استفاده از فیلتر هولدر برای جوشکاران در داخل کلاه ماسک جوشکاری توصیه می‌شود. در صورت استفاده جوشکاران از ماسک تنفسی، فیلتر هولدر باید خارج از ماسک صورت برای تعیین ضریب حفاظتی ماسک تنفسی استفاده گردد. همچنین، در هنگام نمونه‌برداری با هد فیلتر ۲۵ میلی‌متری و فیلتر از نوع استرسلولزی، باید مراقبت بیشتری در برابر بارگذاری اضافی بر روی فیلتر انجام شود.

مراتب نمونه‌برداری از ذرات هوابرد فلزات در شرایط ویژه:

نوع نمونه‌برداری از ذرات هوابرد فلزات و ترکیبات آن، بر اساس TLV آنها و با توجّه به فاکتور استنشاقی یا تنفسی مشخص می‌شود. به عنوان مثال، در مورد اندازه ذرات تنفسی و استنشاقی فلز منگنز و ترکیبات آن، دو مورد TLV ارائه شده است که باید در نمونه‌برداری‌ها مد نظر قرار گیرند. لازم به ذکر است که در برخی موارد TLV فلزات (برای مثال سرب و ترکیبات آن) بر اساس اندازه ذرات ذکر نشده است. در چنین مواقعی،

نوع نمونه‌برداری می‌بایست بر اساس آخرین اطلاعات ارائه شده در روش‌های نمونه‌برداری و آنالیز سازمان‌های NIOSH یا OSHA تعیین شود.

منابع و مراجع اطلاعاتی

Oregon OSHA Technical Manual. December 2014. Available from: https://osha.oregon.gov/OSHARules/technical-manual/Section2-Chapter1.pdf

Sampling and Analysis of Gases and Vapours [Air Monitoring Methods]. 2009. Documentations and Methods. January 2012. Available from: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/3527600418.amsampgase0011

Analytical Methods Committee AMCTB No. 97. 2020. Thermal desorption part 1: introduction and instrumentation. Analytical Methods, 12(26), pp.3425-3428.

Michel F, Brown J. Basics in Air Monitoring. Available from: https://www.sigmaaldrich.com/content/dam/sigma-aldrich/docs/Supelco/General_Information/1/01_Basics%20of%20Air%20Monitoring.pdf

Jiménez, A.S., van Tongeren, M. and Aitken, R.J., 2012. Guidance for collection of inhalable and respirable Ni dust. IOM Rep, 538.

SKC. An Introduction to Air Sampling. Available from: https://www.skcltd.com/images/pdfs/Introduction-to-Air-Sampling-A5-Issue-1.pdf

Cherrie, J.W., Brosseau, L.M., Hay, A. and Donaldson, K., 2013. Low-toxicity dusts: current exposure guidelines are not sufficiently protective. Annals of occupational hygiene, 57(6), pp.685-691.

I. Pump operation and flow calibration Section a: pump operation. Available from: https://courses.washington.edu/envh555/Pumps_2009.pdf

Azari, M. and QUE, H.S., 2002. Development of a new method for sampling and analysis of biomarker of lipid peroxidation in exhaled breath. Tanaffos, 1(4): 51-59.

Cherrie, J.W., Brosseau, L.M., Hay, A. and Donaldson, K., 2013. Low-toxicity dusts: current exposure guidelines are not sufficiently protective. Annals of occupational hygiene, 57(6): 685-691.

Jafari, M.J., Shafiei, B., Rezazadeh, A.M. and Movahhedi, M., 2010. Occupational exposure to welding fumes using different ventilation scenarios. International Journal of Occupational Hygiene, 2: 1-5, 2010.

فصل ۶: روش‌های تجزیه دستگاهی





۶–۱) مقدمه

ارکان رشته مهندسی بهداشت حرفه‌ای بر پایه پیش‌بینی، شناسایی، ارزشیابی و کنترل استوار است. در بخش ارزشیابی مواجهه‌های کارکنان با ترکیبات شیمیایی، بخش‌های نمونه‌برداری و آنالیز بسیار حائز اهمیت هستند. در این رابطه، مطالب کلی نمونه‌برداری در فصل ۵ توضیح داده شد و در این فصل نیز تلاش خواهد شد تا اطلاعات کلی در مورد روش‌های آنالیز ارائه شود. در ادامه، در فصل ۷ موضوع اعتبار روش‌ها و در فصل ۸ نحوه گزینش روش مناسب برای ارزشیابی مطرح خواهد شد.

به‌طور کلی، فصل ششم با هدف آشنایی کارشناسان مهندسی بهداشت حرفه‌ای با شیمی آنالیز تنظیم گردیده است. نویسنده این کتاب بر این باور است که هرچند کارشناسان مهندسی بهداشت حرفه‌ای به‌طور معمول درگیر با کارهای آزمایشگاهی نیستند، اما داشتن اطلاعات شیمی و به‌خصوص شیمی آنالیز در بررسی کیفیت عملکرد آزمایشگاه‌ها بسیار مهم است. هدف اصلی فصل ششم آشنایی بیشتر کارشناسان مهندسی بهداشت حرفه‌ای با روش‌های آنالیز دستگاهی است تا از این طریق بتوانند با برخورداری از اطلاعات مناسب، ارزشیابی عوامل شیمیایی را ارتقاء بخشند.

روش‌های اصلی آنالیز دستگاهی که برای تجزیه نمونه‌های پایش فردی کارکنان با مواد شیمیایی در روش‌های استاندارد سازمان‌های NIOSH و OSHA به‌کار برده شده‌اند شامل روش‌های طیف‌سنجی نوری[1]، طیف‌سنجی اتمی[2]، کروماتوگرافی گازی[3]، کروماتوگرافی مایع با عملکرد عالی[4]، روش شمارش الیاف آزبست توسط میکروسکوپ تباین نوری[5] و تفرق اشعه X[6] برای تشخیص سیلیس کریستالی است که به‌ترتیب در فصل ششم مورد بررسی قرار داده می‌شوند.

۶-۱-۱) طیف‌سنجی نوری

اسپکتروفتومتر ابزاری بسیار ارزشمند برای اندازه‌گیری ترکیبات شیمیایی در آزمایشگاه‌های تشخیص طبی، آزمایشگاه‌های صنایع و سم‌شناسی، و آزمایشگاه‌های بهداشت حرفه‌ای و محیط است. این دستگاه از طریق اندازه‌گیری میزان جذب پرتوهای تابشی در طیف‌های فرابنفش (UV)، مرئی (VIS) و مادون قرمز (IR) توسط آنالیت‌های شیمیایی، آنها را به‌طور کیفی و کمّی آنالیز می‌کند. جذب انرژی تشعشعی در دامنه مرئی توسط ترکیبات رنگی انجام می‌شود، در حالی که ترکیبات بی‌رنگ با توجّه به ساختار مولکولی‌شان می‌توانند جاذب انرژی تشعشعی UV یا IR باشند.

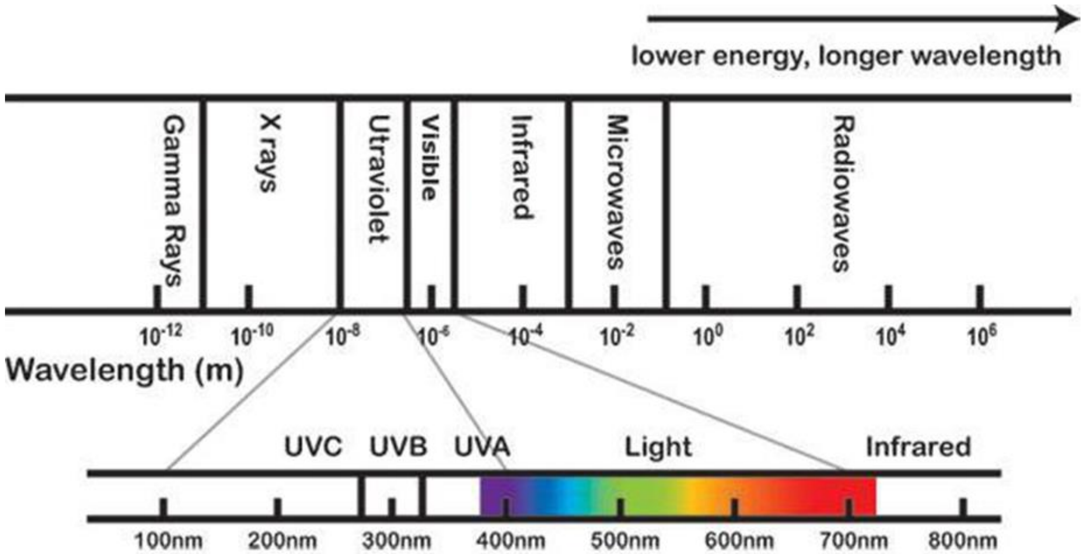
۶-۱-۱-۱) اجزای دستگاه اسپکتروفتومتر مرئی–فرابنفش

اسپکتروفتومتر از دو ابزار اصلی طیف‌سنج[7] برای تولید نور در طول موج‌های مختلف و یک فتومتر[8] برای اندازه‌گیری شدت نور تشکیل شده است. مکانیسم کار دستگاه بر اساس جذب انرژی تشعشعی توسط مولکول‌های شیمیایی است. طیف انرژی تشعشعی مورد استفاده در ناحیه مرئی–فرابنفش (UV-VIS) در دامنه ۲۰۰-۳۸۰

---

[1] Optical Spectrophotometry
[2] Atomic Absorption Spectroscopy
[3] Gas Chromatography
[4] High Performance Liquid Chromatography
[5] Phase Contrast Microscopy
[6] Xray Diffraction
[7] spectrometer
[8] Photoresister

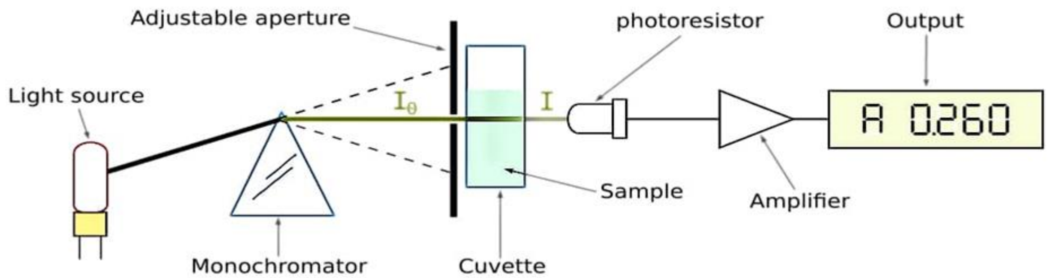
نانومتر برای طیف UV و ۳۸۰-۷۵۰ نانومتر برای طیف VIS است. به‌طور کلی، منبع انرژی تشعشعی در سیستم‌های مدرن اسپکتروفتومتر UV-VIS، دامنه طول موج را از ۱۹۰ نانومتر در ناحیه UV تا ۱۱۰۰ نانومتر در ناحیه اوایل IR برای کار دستگاه تأمین می‌کند (شکل ۱-۶). لازم به‌ذکر است که با توجّه به مقتضیات پرتوی تابشی IR، دستگاه اسپکتروفتومتر IR یا FTIR به‌صورت مستقل از دستگاه UV-VIS ساخته می‌شود.



شکل ۱-۶) دامنه انرژی تشعشعی در دستگاه‌های مدرن اسپکتروفتومتر

طیف انرژی تابشی[1] برای طیف‌سنجی و آنالیز ترکیبات مختلف در پرتوهای اشعه فرابنفش، مرئی و مادون قرمز، بخش کوچکی از طیف امواج الکترومغناطیسی است. دستگاه اسپکتروفتومتر به گونه‌ای طراحی شده است که نمونه آنالیت شیمیایی برای آنالیز بین طیف‌سنج و فتومتر قرار می‌گیرد. پس از عبور پرتو تابشی از آنالیت شیمیایی، میزان جذب توسط فتومتر اندازه‌گیری می‌شود و سیگنال به‌صورت تبدیل انرژی تشعشعی به جریان الکتریسته در نمایشگر به نمایش گذاشته می‌شود (شکل ۱-۶).

[1] electromagnetic spectrum



شکل ۲-۶) اجزای سیستم طیف‌سنج نوری در دامنه UV-VIS

لازم به‌ذکر است میزان جذب انرژی منبع تشعشعی وابسته به تراکم ترکیب است و ولتاژ تغییرات جریان الکتریسته نیز متناسب با میزان تراکم آنالیت شیمیایی تغییر می‌کند. اسپکتروفتومترها در اشکال و اندازه‌های مختلفی تولید می‌شوند و کاربردهای چندمنظوره دارند که این تنوع در اسپکتروفتومترهای موجود، بر اساس کاربرد و عملکرد مورد نظر آنها می‌باشد.

۶-۱-۱-۱-۱) بیان ریاضی انرژی تابشی بر حسب فرکانس پرتو تابشی

$$E = h\nu$$

که در آن:

E= انرژی بر حسب ژول
h= ضریب پلانک بر حسب ژول.ثانیه (6.62×10^{-34})
ν= فرکانس بر حسب تعداد ارتعاشات در ثانیه

طیف‌سنجی امکان مطالعه نحوه واکنش آنالیت‌های شیمیایی با تشعشعات الکترومغناطیسی به‌صورت جذب و انتشار انرژی را فراهم می‌کند. بسته به محدوده طول موجی که اندازه‌گیری می‌شود، انواع مختلفی از طیف‌سنجی وجود دارد. طیف‌سنجی UV-VIS از نواحی فرابنفش و مرئی طیف الکترومغناطیسی استفاده می‌کند. طیف‌سنجی مادون قرمز از بخش مادون قرمز کم‌انرژی طیف استفاده می‌کند.

۶-۱-۱-۱-۲) بیان ریاضی انرژی تابشی بر اساس طول موج پرتوی تابشی

پرتو الکترومغناطیسی را می‌توان ترکیبی از میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی به‌طور متناوب در نظر گرفت که با حرکت موجی در فضا حرکت می‌کنند. از آنجایی که تابش به‌عنوان یک موج عمل می‌کند، می‌توان آن را از نظر طول موج یا فرکانس طبقه‌بندی کرد که با معادله زیر نشان داده شده است:

$$E=h\nu$$

فرمول بالا به این شکل نیز می‌تواند بیان شود:

$$E=hc/\lambda$$

که در آن:

E= انرژی تابش بر حسب ژول
C= برابر با سرعت نور بر حسب متر بر ثانیه (3×10^8 m/s)
λ= طول موج انرژی بر حسب متر
ν= فرکانس انرژی بر حسب تعداد ارتعاشات در ثانیه
h= ضریب پلانک بر حسب ژول.ثانیه (6.62×10^{-34})

در طیف‌سنجی UV-VIS، طول موج معمولاً بر حسب نانومتر (۱ نانومتر= $۱۰^{-۹}$ متر) بیان می‌شود. از معادلات مشخص است که تابش با طول موج کوتاه‌تر دارای انرژی بیشتری است. در طیف‌سنجی UV-VIS، نور فرابنفش با طول موج کوتاه، بیشترین انرژی را داراست. این انرژی بالا ممکن است گاهی منجر به بروز واکنش‌های فتوشیمیایی ناخواسته در هنگام اندازه‌گیری نمونه‌های حساس به نور شود و مشکلاتی را ایجاد کند.

۶-۱-۱-۱-۳) فرایند جذب پرتو تابشی توسط مولکول‌ها در طیف‌سنجی

هنگامی که پرتو تابشی در طیف‌سنج UV-VIS با ماده برخورد می‌کند، واکنش‌ها می‌توانند به چند شکل رخ دهند، از جمله بازتاب، پراکندگی، جذب، فلورسانس/فسفرسانس (جذب و انتشار مجدد) و واکنش‌های فتوشیمیایی

(جذب و شکستن پیوند). به‌طور معمول، در طیف‌سنجی UV-VIS، میزان جذب انرژی برای اندازه‌گیری‌های کمّی و کیفی استفاده می‌شود.

از آنجا که پرتو تابشی نوعی انرژی است، جذب آن توسط ماده باعث افزایش محتوای انرژی مولکول‌ها (یا اتم‌ها) در ماده می‌شود. کل انرژی پتانسیل یک مولکول به‌صورت مجموع انرژی‌های الکترونیکی، ارتعاشی و چرخشی است که به‌صورت فرمول زیر نمایش داده می‌شود:

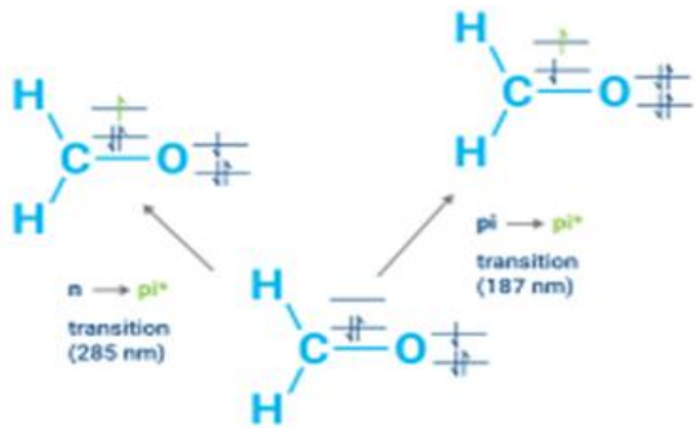
Energy total = E electronic + E vibrational + E rotational

جذب پرتوی تابشی UV و VIS باعث تغییرات الکترونیکی در اوربیتال‌های پیوست‌های مولکولی و در طول موج‌های با انرژی تابشی کمتر یا طول موج‌های بزرگتر (در دامنه طول موج‌های IR) باعث تغییرات جزئی چرخشی[1] یا حرکات دورانی مولکول‌ها و یا حرکات نوسانی[2] اتم‌ها یا گروه‌هایی از اتم‌ها در یک مولکول می‌گردد و ترتیب قوت آنها به ترتیب زیر است:

E electronic > E vibrational > E rotational

در برخی از مولکول‌ها و اتم‌ها، پرتوهای تابشی UV و VIS دارای انرژی کافی برای انتقال بین سطوح مختلف انرژی الکترونیکی هستند. طول موج نور جذب شده دارای انرژی لازم برای حرکت الکترون از سطح انرژی پایین‌تر به سطح انرژی بالاتر است. شکل ۳-۶ نمونه‌ای از انتقال‌های الکترونی[3] در فرمالدئید و طول موج‌های نوری مسئول آن را نشان می‌دهد.

[1] Rotational
[2] Vibrational
[3] Electronic Transitions



شکل ۳-۶) برانگیختگی اوربیتال‌های الکترونیکی مولکولی به‌صورت انتقال‌های الکترونی بعد از جذب پرتوهای تابشی

در شکل ۳-۶، انتقال‌های الکترونی فرمالدئید از پیوند C-O برانگیخته شده در نتیجه جذب انرژی اتفاق می‌افتد و به‌طور مقطعی تغییر ساختار اوربیتالی صورت می‌گیرد. به‌عبارت دیگر در این حالت الکترون از اوربیتال p با جذب پرتو تابشی UV در طول موج ۱۸۷ نانومتر به اوربیتال *p می‌رود و یا با جذب پرتو تابشی در طول موج ۲۸۵ نانومتر انتقال الکترون به اوبیتال n اتفاق می‌افتد. به‌طور کلی پیوست بین اتم‌هایی که جاذب انرژی تابشی هستند، کروموفر[1] نامیده می‌شود که بعد از جذب انرژی می‌تواند موجب برانگیختگی به‌شرح یکی از موارد جدول زیر شود:

جدول ۱-۶) مثال‌هایی از پیوست‌های کروموفر جاذب پرتو تابشی UV-VIS

کروموفر	فرمول ترکیبات	مثالی از ترکیبات	λ_{max} (nm)
Carbonyl (ketone)	RR’C=O	Acetone	271
Carbonyl (aldehyde)	RHC=O	Acetaldehyde	293
Carboxyl	RCOOH	Acetic acid	204
Amide	RCONH2	Acetamide	208
Ethylene	RCH=CHR	Ethylene	193
Acetylene	RC=CR	Acetylene	173
Nitrile	RC=N	Acetonitrile	<160
Nitro	RNO2	Nitromethane	271

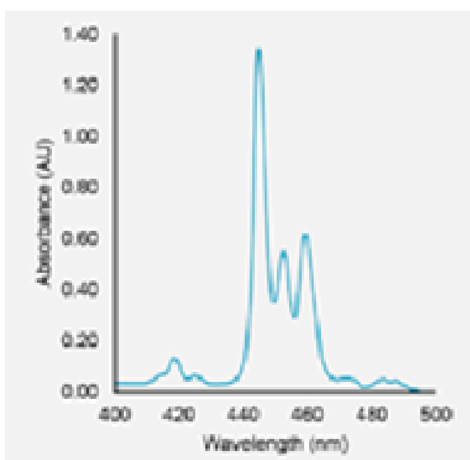
[1] Chromophore

۶–۱–۱–۱–۴) برانگیختگی اتم‌های مولکول به‌صورت ارتعاشی و چرخشی

علاوه بر انتقال الکترون در ساختار مولکولی ناشی از جذب انرژی تابشی، اثرات دیگری نیز ممکن است مشاهده شود. در برخی مولکول‌ها، جذب انرژی تابشی توسط الکترون‌های پیوند می‌تواند به ارتعاش مولکولی منجر شود، در حالی که در برخی دیگر، این انرژی باعث چرخش مولکولی می‌شود. تفاوت سطوح انرژی مرتبط با ارتعاش و چرخش به‌مراتب کمتر از سطوح انرژی درگیر در انتقال الکترون است. به همین دلیل، تحریک ناشی از این پدیده‌ها در طول موج‌های نسبتاً بلندتر رخ می‌دهد. تحریک ارتعاشی[۱] معمولاً با تابش IR در طول موج‌های کوتاهتر اتفاق می‌افتد، در حالی که تحریک چرخشی[۲] با تابش IR با طول موج بزرگتر یا حتی توسط امواج مایکروویو رخ می‌دهد.

۶–۱–۱–۱–۵) جذب پرتو تابشی در دامنه طول موج‌های مرئی

اوربیتال‌های الکترونی پیوندهای ترکیبات در مولکول‌هایی که در حالت پایه قرار دارند، دارای سطوح انرژی منحصربه‌فردی هستند. همچنین، سطوح انرژی برانگیخته‌شده این اوربیتال‌ها نیز ویژگی‌های منحصربه‌فردی دارند. جذب انرژی در طول موج خاص، به‌عنوان مشخصه‌ای کیفی برای ترکیبات شیمیایی در نظر گرفته می‌شود. در این راستا، جذب پرتو تابشی در طول موج خاص و نقطه اوج یا پیک حداکثر جذب، در شکل ۴–۶ نمایش داده شده است.



شکل ۴–۶) گرافی از جذب پرتو تابشی مرئی توسط یک ترکیب

[1] vibration

[2] Rotation

طیف جذبی یک ترکیب، ویژگی فیزیکی مفیدی است که می‌توان از آن هم برای آنالیز کیفی (شناسایی ترکیب) و هم برای تجزیه و تحلیل کمّی (تعیین غلظت) بهره برد. ترکیبات شیمیایی پرتوهای تابشی را در دامنه‌ای از طول موج‌های مرئی جذب می‌کنند و در طول موج‌های دیگر بازتاب می‌دهند. این رفتار جذبی و بازتابی ترکیبات، در جدول ۲-۶ ارائه شده است.

جدول ۲-۶) طول موج‌های پرتو تابشی جذب و منعکس شده مرتبط با رنگ طول موج

طول موج جذب شده	رنگ جذب شده	رنگ دیده شده
700 nm	Red	Green
600 nm	Orange-Red	Blue-Green
550 nm	Yellow	Violet
530 nm	Green-Yellow	Red-Violet
500 nm	Green	Red
450 nm	Blue	Orange
400 nm	Violet	Yellow

ساختار مولکول‌های پیچیده ترکیبات آلی با استفاده از اسپکتروفتومتر UV-VIS قابل تشخیص می‌باشند. با این حال، طیف گسترده‌ای از ترکیبات معدنی نیز با روش طیف‌سنجی قابل تجزیه هستند. برای مثال، ترکیباتی که دارای یک اتم غیرفلزی و پیوند دوگانه با اکسیژن هستند، در ناحیه UV جذب می‌شوند. چندین کروموفور با پیوند دوگانه معدنی وجود دارند که پیک‌های جذب مشخصه‌ای را نشان می‌دهند. در برخی موارد، اندازه‌گیری مواد معدنی ممکن است نیاز به فرآیند ثانویه‌ای مانند کمپلکس شدن با یک معرف رنگ‌دهنده یا اکسیداسیون داشته باشد. به‌عنوان مثال، اکسید منگنز باید(MnO) (II) به اکسید منگنز (Mn_2O_7) (VII) اکسید شود و به‌عنوان یون پرمنگنات (MnO_4) اندازه‌گیری شود.

۶-۱-۱-۱-۶)   اجزاء سازنده دستگاه طیف‌سنجی UV-VIS

همان‌طور که در شکل ۲-۶ نشان داده شد، دستگاه اسپکتروفتومتر شامل یک منبع نور[۱]، تک‌فام ساز انرژی تشعشعی[۲] برای انتخاب طول موج مورد نظر، کووت[۳] یا همان ظرف شیشه‌ای برای قرار دادن نمونه که در دستگاه‌های UV-VIS می‌بایست از جنس کوارتز خالص باشد، دستگاه فتومتر و تقویت کننده[۴] و یک صفحه نمایش دیجیتال است.

۶-۱-۱-۱-۷)   اهمیت قانون بیر و لامبرت در طیف‌سنجی

جذب انرژی تشعشعی در دستگاه طیف‌سنج نوری بر اساس قانون بیر و لامبرت[۵]، ارتباط مستقیمی با تراکم آنالیت دارد که در دامنه خاصی از تراکم آنالیت، این رابطه به‌صورت معادله خطی درجه یک است. بیان ریاضی انرژی تشعشعی و ارتباط آن با طول موج و میزان جذب انرژی تشعشعی بر اساس قانون بیر و لامبرت به‌شرح زیر است:

$$A= \log I_0/I_t= \varepsilon BC$$

که در آن:

A= جذب انرژی تشعشعی

I_0= شدت انرژی تشعشعی ورودی به کووت

I_t= شدت انرژی تشعشعی خروجی از کووت

$\log I_0/ I_t$= میزان جذب انرژی توسط آنالیت

Ɛ= جذب مولاری ترکیب

B= پهنای کووت (در اغلب موارد ۱ cm)

C= تراکم آنالیت در کووت بر حسب مولار

[1] Light Source
[2] Monochromator
[3] Cuvette
[4] Amplifier
[5] Lambert & Beer’s Law

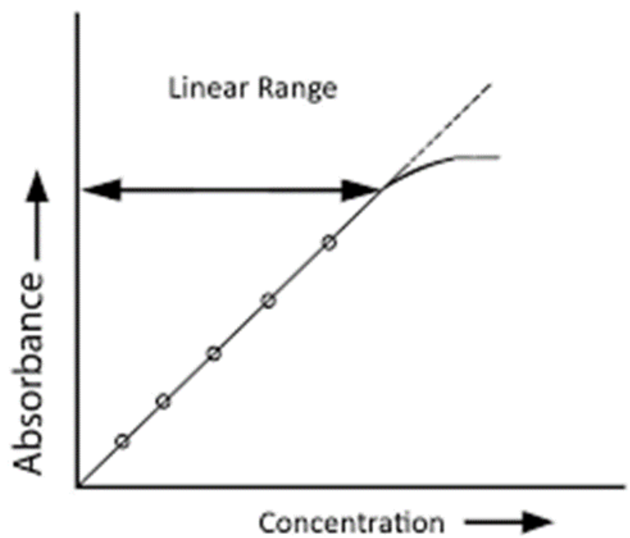
ارتباط جذب با میزان عبور در طیف‌سنجی:

$$A = \log_{10}\frac{I_0}{I}$$
$$A = -\log_{10} T$$

که در آن:

T= میزان عبور پرتو تابشی[1] ($T=I_t/I_0$)

همان‌طور که بیان شد، قانون بیر و لامبرت بیان‌کننده رابطه خطی بین تراکم نمونه و میزان جذب انرژی توسط نمونه است که در شکل ۵-۶ نشان داده می‌شود.



شکل ۵-۶) ارتباط خطی میزان جذب انرژی تشعشعی و تراکم نمونه

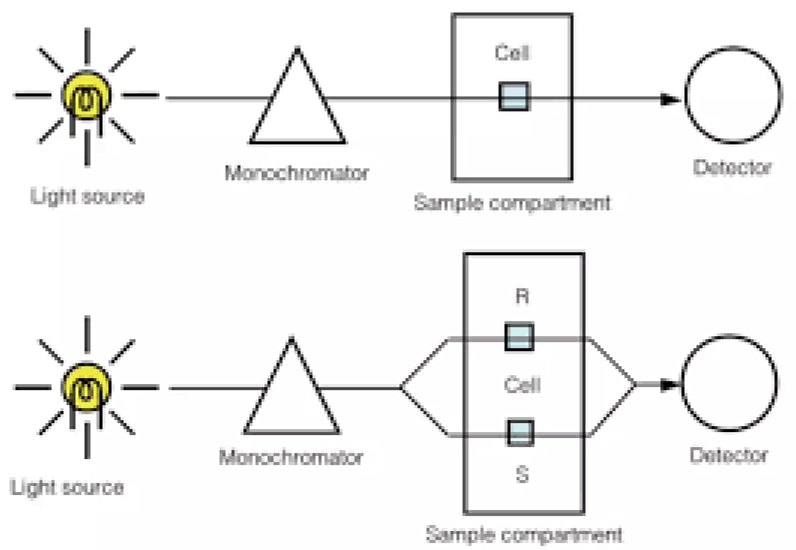
۶-۱-۱-۲) دستگاه طیف‌سنج مجهز به دو منبع انرژی تشعشعی

اسپکتروفتومتر با دو ستون انرژی تشعشعی[2] به اسپکتروفتومتر دارای یک ستون انرژی تشعشعی ارجحیت دارد و همان‌طور که در شکل ۶-۶ نشان داده می‌شود، در این اسپکتروفتومتر یک ستون انرژی از نمونه شاهد عبور

[1] Transmittance

[2] Double Beam Spectrophotometer

می‌کند و میزان جذب آن را اندازه‌گیری می‌کند و ستون نوری دیگر از محل قرارگیری نمونه عبور کرده و میزان جذب آن را اندازه‌گیری می‌کند. در نهایت جذب انرژی تشعشعی کلی از تفاضل دو عدد جذب به‌دست آورده می‌شود و خطای جذب توسط نمونه شاهد بدین ترتیب حذف می‌شود. اسپکتروفتومتر با دو ستون انرژی تشعشعی می‌تواند جذب ترکیبات مختلف را در دامنه طول موج‌های ۱۸۵ الی ۱۰۰۰ نانومتر اندازه‌گیری نماید.



شکل ۶-۶) اسپکتروفتومتر با دو ستون انرژی تشعشعی

۶-۱-۱-۳) شرح بخش‌های تشکیل‌دهنده اسپکتروفتومتر

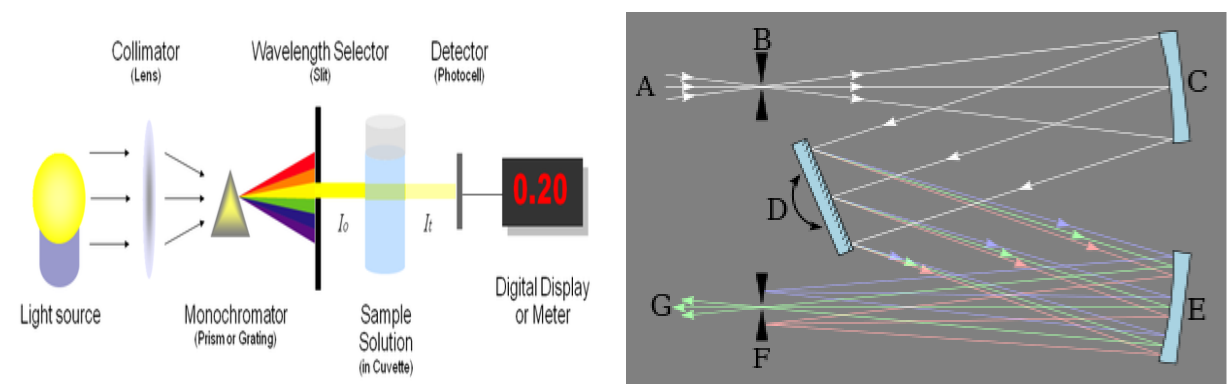
۶-۱-۱-۳-۱) منبع انرژی تشعشعی

در اسپکتروفتومتر معمولاً از سه منبع مختلف برای تولید نور با طول موج‌های مختلف استفاده می‌شود. رایج‌ترین منبع نور مورد استفاده در اسپکتروفتومتر برای طیف مرئی و فرابنفش به‌ترتیب لامپ تنگستن، لامپ هیدروژن یا دوتریوم است. عامل مولد انرژی تشعشعی در دامنه طول موج‌های مادون قرمز نیز یک میله یا لوله استوانه‌ای است

که از اکسیدهای عناصر کمیاب زمین مانند اکسید زیرکونیوم (ZrO_2)، اکسید ایتریم (Y_2O_3) و اکسید اِربیوم (Er_2O_3) تشکیل شده است که Nernst glowers نامیده می‌شوند.

۶-۱-۱-۳-۲) تک‌فام ساز

بخش تک‌فام‌ساز دستگاهی است که برای جداسازی طول‌موج‌های انرژی تشعشعی به کار می‌رود. تک‌فام‌سازها با استفاده از منشور و آینه‌ها، نور را پراکنده کرده و همچنین با هدایت انرژی از طریق سیستم‌های غربال‌کننده اپتیکی، انرژی تشعشعی را تک‌رنگ می‌کنند. در اسپکتروفتومتر IR به دلیل جذب انرژی تابشی IR توسط کوارتز، سیستم تک‌فام ساز از جنس کریستال‌های نمک‌های معدنی از قبیل کلرید سدیم[1]، برومید پتاسیم[2] یا یودید سزیوم[3] ساخته می‌شوند.

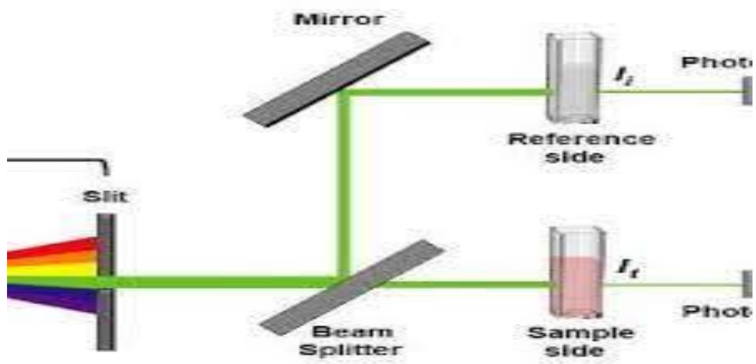


شکل ۷-۶) ساختار سیستم تک‌فام ساز و نحوه عملکرد آن در دستگاه طیف‌سنجی

تقسیم‌کننده انرژی تشعشعی

تقسیم‌کننده انرژی تشعشعی[4] در دستگاه‌های طیف‌سنج مجهز به دو ستون انرژی تشعشعی بخشی از سیستم تک‌فام ساز است که قادر است پرتو تولید شده از یک منبع انرژی تشعشعی را تقسیم نموده و آن را به دو پرتو با شدت برابر تبدیل کند (شکل ۸-۶).

[1] Sodium Chloride
[2] Potassium Bromide
[3] Caesium Iodide
[4] Beam Splitter



شکل ۸-۶) سیستم تقسیم‌کننده انرژی تشعشعی

شیار خروجی

وظیفه شیار خروجی[1] متمرکز کردن شعاع‌های نوری تفکیک شده بر روی کووت است.

۶-۱-۱-۳-۳) محل استقرار نمونه

محل استقرار نمونه[2] از کووت و جایگاه قرارگیری کووت تشکیل شده است که نمونه در آنها قرار می‌گیرد (شکل ۶-۹). در دستگاه اسپکتروفتومتر UV-VIS از کووت‌هایی از جنس Soft glass، بروسیلیکات، کوارتز و پلاستیک استفاده می‌شود. کووت‌های شیشه‌ای مخصوص برای دامنه طول‌موجی ۳۲۰ تا ۹۵۰ نانومتر مناسب هستند. از کووت‌های ساخته‌شده از جنس کوارتز برای طول‌موج‌های کمتر از ۳۲۰ نانومتر استفاده می‌شود. کووت‌ها در سطوح مقطع دایره‌ای و مربع موجود می‌باشند. کووت‌های مربع از جذب بیشتری برخوردارند. برای آنالیز ترکیبات در دامنه طول‌موج‌های IR، از کووت‌های شیشه‌ای غیرکوارتزی استفاده می‌شود تا با جذب پرتوهای IR باعث کاهش دقت آنالیز نشوند.

[1] Exit Slit

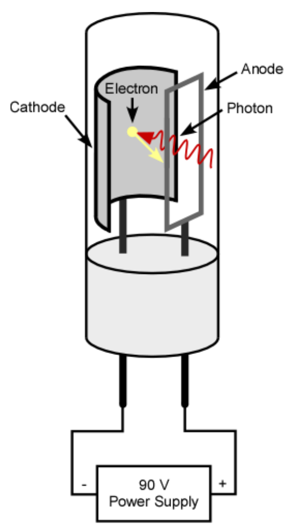
[2] Sample holder



شکل ۹-۶) کووت با سطح مقطع مربعی شکل و جایگاه قرارگیری آن در دستگاه طیف‌سنجی

۶-۱-۱-۳-۴) آشکارساز فتومتر

انرژی تشعشعی (فوتون) ایجادشده توسط منبع تولید انرژی، جریان الکتریسته‌ای از سمت کاتد به سمت آند مستقر در سیستم برقرار می‌کند. جذب بخشی از انرژی تشعشعی تابشی توسط آنالیت موجود در کووت، منجر به تغییراتی در نرخ جریان الکتریسته می‌شود. سیگنال حاصل از این تغییرات جریان الکتریسته در فتومتر، به‌عنوان مقیاسی از غلظت نمونه اندازه‌گیری می‌شود (شکل ۱۰-۶).



شکل ۱۰-۶) ساختار آشکارساز فتومتر

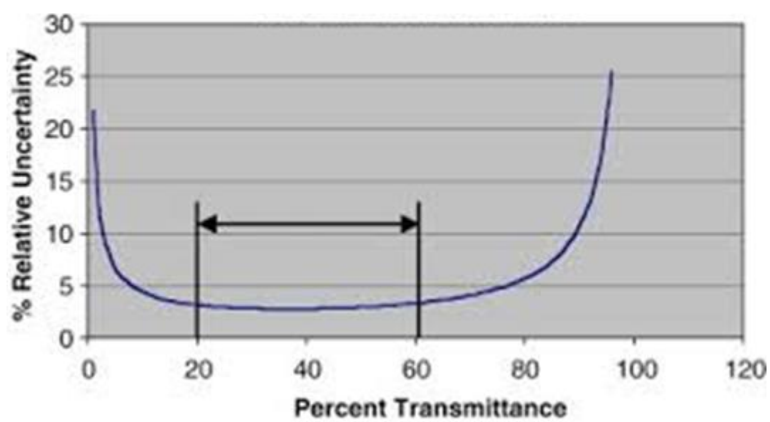
۶-۱-۱-۴)   نکات کلیدی در استفاده از اسپکتروفتومتر UV-VIS

۱- دستگاه اسپکتروفتومتر، مانند هر دستگاه دیگر، باید به‌طور سالیانه برای اطمینان از دقت آنالیز کالیبره شود. صحت طول‌موج سیستم پس از بررسی منبع تابشی دستگاه (مانند لامپ جیوه یا دوتریوم) و انجام یک یا چند آزمون توصیه‌شده برای آنالیز ترکیبات رنگی و اندازه‌گیری حداکثر جذب انرژی تشعشعی در تراکم‌های خاص، به‌شرح زیر بررسی می‌شود.

- **محلول دی‌کرومات پتاسیم با غلظت ۵۰ mg/L در اسید سولفوریک ۰.۰۱ نرمال در طول موج‌های جذب نوری ۲۵۷ و ۳۵۰ نانومتر**
- **محلول پارانیتروفنل در غلظت ۰.۰۴ mmol/lit در سود ۰.۰۱ نرمال و طول موج ۴۰۱ نانومتر**
- **محلول سولفات آمونیوم کبالت در غلظت ۰.۷۳۵ mmol/lit در اسید سولفوریک ۰.۱۸ مولار در طول موج ۵۶۲ نانومتر**

*** کنترل صحّت طول موج‌های دستگاه هر سه تا شش ماه یکبار توصیه شده است.**

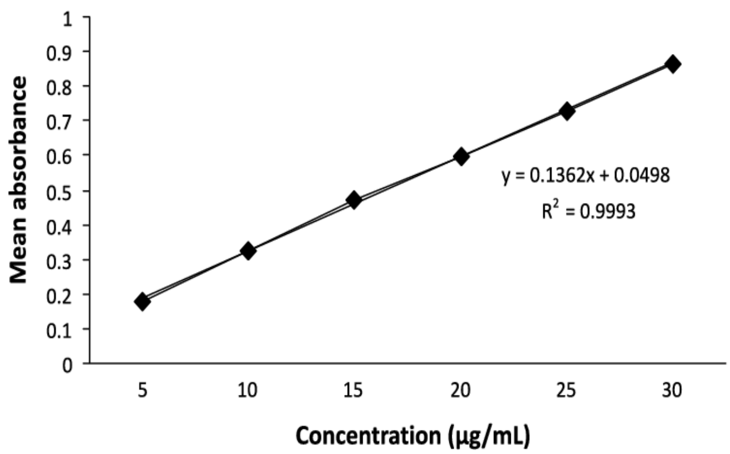
۲- دستگاه‌های اسپکتروفتومتر مانند هر دستگاه دیگری خطا دارد و کار با دستگاه با حداقل خطا در دامنه خاصی از حدود جذب[1] یا انتشار[2] بایستی مورد توجّه قرار گیرد. در این زمینه جذب ایده‌آل با حداقل خطا در دامنه انتشار ۲۰ الی ۶۰ درصد گزارش شده است (شکل ۱۱-۶).



شکل ۱۱-۶) ارتباط درصد خطای آنالیز با میزان عبور نور از نمونه

[1] Absorbance
[2] Transmittance

۳- بر اساس قانون بیر و لامبرت، رابطه جذب با تراکم آنالیت در دامنه غلظتی خاص به‌صورت خطی است (خط کالیبراسیون) و آنالیز نمونه‌ها فقط به‌صورت رابطه خطی معادله درجه یک برآورد می‌شود و کمترین میزان خطا را دارد. دستیابی به رابطه خطی غلظت و جذب[1] برای دستیابی به حداکثر دقت الزامی است. در هر روش مصوب نمونه‌برداری، به دامنه غلظتی آنالیت‌ها که با جذب در قالب معادله درجه یک قابل محاسبه است، اشاره شده و رعایت آن برای دستیابی به حداکثر دقت الزامی است. اشتباه در تهیه غلظت‌های محلول‌های استاندارد ممکن است منجر به خطای عدم مشاهده رابطه خطی شود و دقت آنالیز را کاهش دهد. بررسی کیفیت خط کالیبراسیون دستگاه برای آنالیت‌های مورد نظر باید در فواصل منظم و پس از هر تغییر یا تعمیر دستگاه انجام شود.



شکل ۱۲-۶) خط کالیبراسیون مربوط به رابطه خطی غلظت و جذب

۶-۱-۱-۵) بررسی درستی کار بخش فتومتر

وضعیت کاری دستگاه فتومتر باید بر اساس بررسی حداکثر جذب انرژی تشعشعی در تراکم مشخصی از آنالیت ارزیابی شود. در صورت عدم دستیابی به نتیجه مطلوب، کیفیت لامپ منبع تأمین‌کننده انرژی برای حداکثر تابش و همچنین نوع و کیفیت عملکرد تک‌فام‌ساز باید بررسی گردد. با توجّه به موارد گفته‌شده، آزمون زیر باید برای بررسی سلامت سیستم انجام شود:

[1] Linear Range Concentration

- **محلول دی‌کرومات پتاسیم با غلظت ۵۰ mg/L در اسید سولفوریک ۰.۰۱ نرمال می‌بایست در طول موج ۳۵۰ نانومتر، دارای جذب نوری معادل ۰.۰۰۵±۰.۵۳۶ با در نظر گرفتن محلول شاهد اسید سولفوریک ۰.۰۱ نرمال باشد.**

مشاهده نوسانات انرژی تشعشعی و عدم یکنواختی جذب می‌تواند نشان‌دهنده فرسودگی منبع نور باشد که در این صورت باید در اسرع وقت نسبت به تعمیر دستگاه اقدام شود. تا زمان انجام تعمیرات، نوسانات فتومتریک را می‌توان با قرار دادن نمونه شاهد در کووت و ثبت جذب آن در فواصل کوتاه زمانی (چند دقیقه یک‌بار) و صفر کردن جذب دستگاه بر اساس آن، کنترل کرد. بر اساس توصیه شرکت‌های فروشنده دستگاه‌های اسپکتروفتومتر، نوسانات جذب نوری در محدوده ۰.۰۵۵± به ازای یک ساعت استفاده از دستگاه، قابل قبول است.

۶–۱–۱–۶) کاربردهای دستگاه اسپکتروفتومتر در آنالیز ترکیبات شیمیایی

اسپکتروفتومتر معمولاً برای اندازه‌گیری کمّی و کیفی تراکم ترکیبات رنگی یا ترکیبات بی‌رنگ با توجّه به جذب در طول‌موج‌های VIS و UV مورد استفاده قرار می‌گیرد. در شرایطی که نمونه از چند ترکیب تشکیل شده باشد، می‌توان از روش‌های کمکی برای جداسازی ترکیبات از یکدیگر و سپس تعیین غلظت آن‌ها با اسپکتروفتومتر استفاده کرد. در مواردی که تعداد ترکیبات شیمیایی در یک نمونه مرکب مشخص باشد، می‌توان از فرمول‌های ریاضی مانند معادله دو مجهولی برای دو ترکیب یا معادلات چند مجهولی برای چند ترکیب و به استناد روابط زیر استفاده نمود.

تراکم دو ترکیب در یک نمونه مرکب را که جذب آنها در دو طول موج λ_1 و λ_2 اندازه‌گیری می‌شود را می‌توان بر اساس قانون بیر و لامبرت و با پیش فرض دانستن جذب مولاری برای هر ترکیب، با استفاده از رابطه زیر محاسبه نمود:

$A=\epsilon bC\rightarrow\rightarrow\rightarrow\rightarrow$ فرمول جذب انرژی

$\{A_{\lambda1}=\epsilon_{\lambda1}C_1 + \epsilon_{\lambda1}C_2$

$\{A_{\lambda2}=\epsilon_{\lambda2}C_1 + \epsilon_{\lambda2}C_2$

که در آن:

A: جذب **ϵ: جذب مولاری**

C: غلظت

لازم به‌ذکر است که در صورت مشخص نبودن جذب مولاری در دو طول موج λ_1 و λ_2، این ضرایب به‌طور آزمایشگاهی برای هر ترکیب می‌تواند به‌طور مستقل به‌دست آورده شود.

چند نکته مهم

۱. حداقل خطای آنالیز در شرایط میزان عبور نور در دامنه ۲۰ الی ۶۰ درصد گزارش شده است (شکل ۱۱-۶).

۲. به‌طور کلی، نمونه‌های خیلی رقیق و خیلی غلیظ دارای خطاهای غیرقابل قبول هستند. از این رو، توصیه می‌شود که نمونه‌هایی با میزان عبور نور کمتر از ۱۰ درصد، رقیق‌سازی شوند

۳. حجم محلول در کووت باید بالاتر از قسمتی باشد که نور از آن عبور می‌کند. اگر حجم محلول نهایی کم است، حجم آن باید دو برابر شود و سپس فاکتور رقت در محاسبات نهایی اعمال گردد.

۴. شستشوی متناوب کووت با محلول‌های سود، پتاس و اسید کلریدریک رقیق، وایتکس (۱ به ۱۰ رقیق شده)، اسید سولفوکرومیک و غیره توصیه می‌شود.

۵. کووت را به همراه سایر لوله‌ها نشویید چون ممکن است جداره آن خش‌دار شوند.

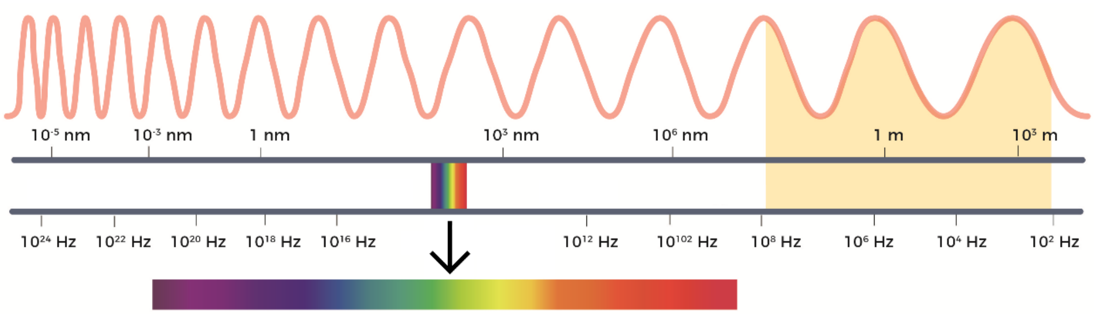
۶. هرگز کووت را با دست لمس نکنید.

۷. کووت باید به‌آرامی در محل خاص خود قرار گیرد و محلول درون آن فاقد حباب باشد. همچنین، در خوانش‌های طولانی، درب کووت باید بسته شود تا از تبخیر محلول جلوگیری شود.

۸. اسپکتروفتومتر پس از تحویل، مطابق دستور کار مندرج در بروشور دستگاه و توسط کارشناس مربوطه، نصب و راه‌اندازی شود. به نظافت و کنترل کیفی دستگاه توجّه شود.

۶-۱-۱-۷) چگونگی کارکرد دستگاه‌های طیف‌سنج مادون قرمز (دستگاه طیف‌سنج ساده IR و دستگاه پیشرفته FT-IR)

طیف‌سنجی IR مرتبط با جذب انرژی تشعشعی در ناحیه مادون قرمز است که به‌طور معمول در دامنه طول موج ۲.۵ الی ۲۵ میکرون انجام می‌شود. همان‌طور که در شکل ۱۳-۶ دیده می‌شود، پرتوهای تشعشعی در این ناحیه دارای طول‌موج بلندتر، فرکانس و انرژی کمتری نسبت به نور مرئی و همچنین فرابنفش هستند. مفهوم طیف‌سنجی IR به‌طور کلی می‌تواند با سه روش اندازه‌گیری بازتاب نور مادون قرمز، انتشار و جذب آن، تجزیه و تحلیل شود. کاربرد عمده طیف‌سنجی مادون قرمز، تعیین گروه‌های عاملی مولکول‌ها و مربوط به شیمی آلی و معدنی است..



شکل ۱۳-۶) طول موج انرژی تشعشعی امواج مادون قرمز در قیاس با طوج موج‌های امواج مرئی و فرابنفش

در طیف‌سنجی IR، مولکول‌های ترکیبات آلی دارای گروه‌های عاملی[1] مختلف جذب کننده انرژی می‌باشند که بر حسب طول موج و میزان جذب ترکیبات به‌صورت کمّی و کیفی تشخیص داده می‌شوند. لازم به‌ذکر است طیف‌سنجی IR از اولین روش‌ها برای شناسایی ترکیبات آلی در نبود آشکارسازهای جرمی و سایر روش‌های پیشرفته گزارش شده است. در طیف‌سنجی IR واحد عدد موجی[2] به مفهوم تعداد موج در یک سانتیمتر به‌عوض طول موج استفاده می‌شود. عدد موجی مرتبط با طول موج به‌شرح رابطه زیر است:

---

[1] Functional Group
[2] Wave Number

$$\nu=\frac{1}{\lambda}$$

طول موج (Wave Length)=λ →→ بر حسب نانومتر

عدد موجی (Wave Number)=ν→→ cm^{-1} بر حسب

جذب انرژی تشعشعی توسط گروه‌های عاملی و مولکول‌ها بر اساس توانایی آن‌ها در ایجاد برانگیختگی ترکیب به‌صورت ارتعاشی یا چرخشی در طول‌موج‌های خاصی از طیف IR است. همان‌طور که قبلاً گفته شد، طیف جذب IR برای هر ترکیب، عامل تشخیص ترکیب یا به عبارت عامیانه، اثر انگشت ترکیب محسوب می‌شود. هر ترکیب با توجّه به زنجیره کربنی و گروه‌های عاملی خود، جاذب انرژی در دامنه IR است. در دوران قبل از کامپیوترهای متداول امروزی (سال‌های قبل از ۱۹۹۰)، اطلاعات طیف جذبی ترکیبات برای تشخیص ترکیب از طریق کتاب‌های مرجع به‌دست می‌آمد، اما در روزگار پیشرفته کامپیوتری امروز، این اطلاعات در حافظه کامپیوتری دستگاه طیف‌سنج IR برنامه‌ریزی شده است و دستگاه می‌تواند نقش شناسایی ترکیب را مستقیماً به‌عهده بگیرد. برای مثال، ترکیبات مختلف با گروه‌های عاملی متفاوت دارای طیف جذبی خاص خود هستند (جدول ۳-۶).

جدول ۳-۶) طیف جذبی گروه‌های عاملی ترکیبات مختلف و درجه قوت آنها

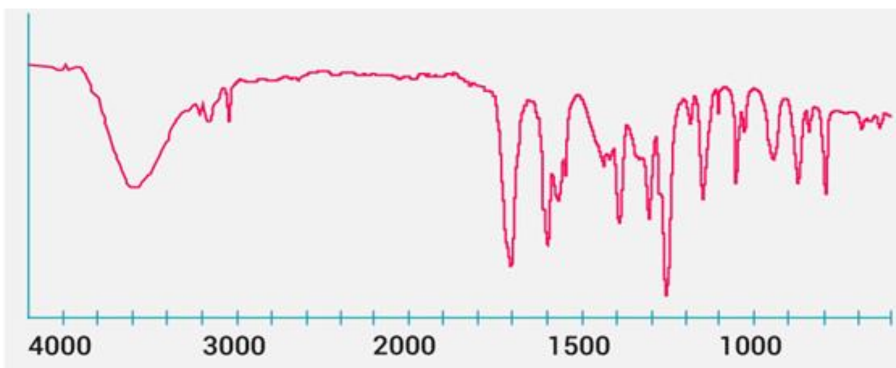
Absorption Intensity	*Absorption Location (cm^{-1})*	*Functional Group*
Medium to strong	2,850–2,975	Alkane (C–H)
Strong, broad	3,400–3,700	Alcohol (O–H)
Weak to medium Medium	1,640–1,680 3,020–3,100	Alkene (C=C) (C=C–H)
Medium Strong	2,100–2,250 3,300	Alkyne (C≡C) (C≡C–H)
Medium	2,200–2,250	Nitrile (C≡N)
Weak	1,650–2,000	Aromatics
Medium	3,300–3,350	Amines (N–H)
Strong	 1,720–1,740 1,715 1,735–1,750 1,700–1,725	Carbonyls (C=O) Aldehyde (CHO) Ketone (RCOR) Ester (RCOOR) Acid (RCOOH)

در طیف‌سنجی IR، گروه‌های عاملی متصل به بدنه یک مولکول، جذب کننده انرژی تشعشعی در دامنه ۱۳۰۰ تا ۴۰۰۰ بر حسب cm^{-1} است که با توجّه به طیف‌های جذبی مولکول، گروه‌های عاملی آن قابل تشخیص می‌باشند.

پیوست‌های مولکولی که برای هر ترکیب اختصاصی است، دارای جذب انرژی IR به‌صورت منحصر به‌فرد می‌باشد که شبیه به اثر انگشت آن ترکیب شناخته می‌شود و دامنه این طول موج‌ها از cm^{-1} ۴۰۰ تا ۱۳۰۰ می‌باشد (شکل ۱۴-۶).



شکل ۱۴-۶) طول موج IR برای شناسایی ترکیب آلی



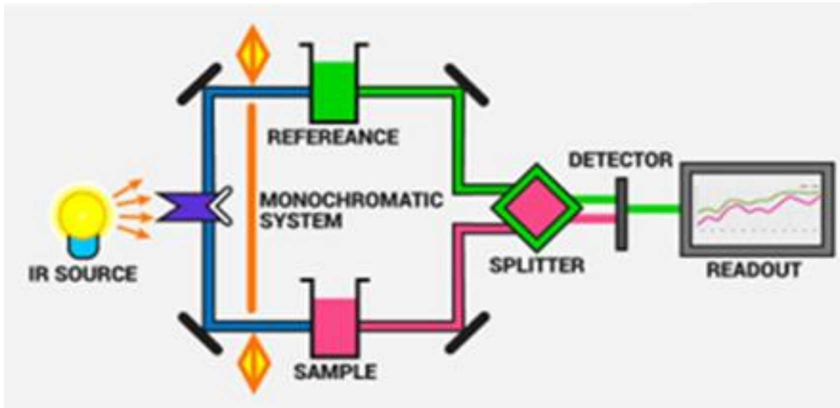
شکل ۱۵-۶) نمایش گراف طیف‌سنجی IR یک مولکول

نمونه‌ها در اشکال فیزیکی جامد، مایع و گاز با استفاده از روش طیف‌سنجی مادون قرمز قابل شناسایی هستند. نمونه‌های جامد را می‌توان با خرد کردن و مخلوط کردن آن‌ها با ماده‌ای پرکننده که جاذب نباشد، به صورت دیسک‌های کوچک تهیه و برای اندازه‌گیری در دستگاه قرار داد. نمونه‌های مایع معمولاً در یک کووت شیشه‌ای غیر کوارتزی یا از جنس نمک‌های معدنی کلرید سدیم یا فلوراید کلسیم قرار می‌گیرند و از نظر جذب نور IR اندازه‌گیری می‌شوند. محفظه نمونه برای گازها به منظور افزایش حساسیت جذب، دارای طول قابل توجّهی است و جنس آن از شیشه شفاف غیر کوارتز انتخاب می‌شود، زیرا کوارتز جاذب IR است.

از آنجایی که آب دارای دو پیک جذب پرتو تابشی مادون قرمز است، نمی‌توان از آن به‌عنوان حلال برای طیف‌سنجی IR استفاده کرد. علاوه بر این، بخارات آب کندانس شده به‌عنوان یک حلال قطبی در داخل دستگاه می‌تواند قطعات مختلف طیف‌سنج IR را که از نمک‌های فلزات قلیایی خاکی و هالوژن‌ها ساخته شده‌اند، تخریب کند. حلال‌هایی که قابلیت استفاده در طیف‌سنج IR را دارند شامل کربن تتراکلراید (CCL_4) و کربن دی‌سولفید (CS_2) هستند. حلال‌های قطبی دیگر که برای ترکیبات قطبی‌تر می‌تواند استفاده شود شامل کلروفورم ($CHCL_3$)، متیلن کلراید (CH_2Cl_2)، استونیتریل (C_2H_3N) و استون (C_3H_6O) است و مواد پر کننده برای نمونه‌های جامد پودر ترکیب پتاسیم بروماید (KBr) می‌باشد.

ساختار ظاهری دستگاه طیف‌سنج IR همان‌طور که در شکل ۱۶-۶ دیده می‌شود، مشابه دستگاه طیف‌سنج UV-VIS است، با این تفاوت عمده که اجزای تشکیل‌دهنده سیستم باید به‌گونه‌ای طراحی شوند که جاذب انرژی تشعشعی IR نباشند. به‌طور کلی، سیستم اپتیک از بلورهای نمک‌های معدنی ساخته شده است و منبع مولد انرژی تشعشعی IR، Nernst glower* است که با عبور جریان الکتریسیته و گداخته شدن، عامل تابش پرتو مادون قرمز می‌شود. معمولاً پرتوهای تابشی ساطع شده در دامنه cm^{-1} ۵۰۰۰-۵۹۰۰ از انرژی کافی برای جذب توسط ترکیبات برخوردارند امّا در طول موج‌های بزرگ‌تر که منجر به عدد موجی کوچکتر می‌شود، از انرژی کافی برای نفوذ به ترکیبات برخوردار نمی‌باشد و از این‌رو معمولاً انرژی پرتوهای تابشی در عدد موجی کمتر cm^{-1} ۵۰۰ برای تشخیص ترکیبات شیمیایی قابل استناد نیست. همان‌طور که قبلا ذکر گردید، سیستم Nernst از یک میله از جنس ZrO_2 و Y_2O_3 ساخته شده است که تا دمای ۱۲۰۰ تا ۲۲۰۰ کلوین از طریق جریان الکتریسته گداخته می‌شود و انرژی تابشی در محدوده IR تولید می‌نماید. منبع انرژی دیگر شامل میله کاربید سیلیکون است که با حرارت‌دهی تا دمای ۱۳۰۰-۱۵۰۰ درجه کلوین، عامل تابش IR می‌شود. همچنین، یک سیستم دیگر از رشته‌ای سیمی از جنس آلیاژ نیکل و کروم تشکیل شده است که می‌تواند تا حدود ۱۱۰۰ درجه کلوین حرارت داده شود. همان‌طور که در شکل ۱۵-۶ مشاهده می‌شود، ستون انرژی در دو بخش برای نمونه مورد نظر و نمونه شاهد نشان داده شده است.

پس از عبور از سیستم تجزیه‌کننده، انرژی تشعشعی وارد سیستم آشکارساز (فتوسل) می‌شود و میزان جذب یا انتشار آن در سیستم کامپیوتر دستگاه ثبت می‌گردد.



شکل ۱۶-۶) طرح شماتیک از یک دستگاه طیف‌سنج IR

۶-۱-۱-۸) تفاوت طیف‌سنج IR با طیف‌سنج FTIR

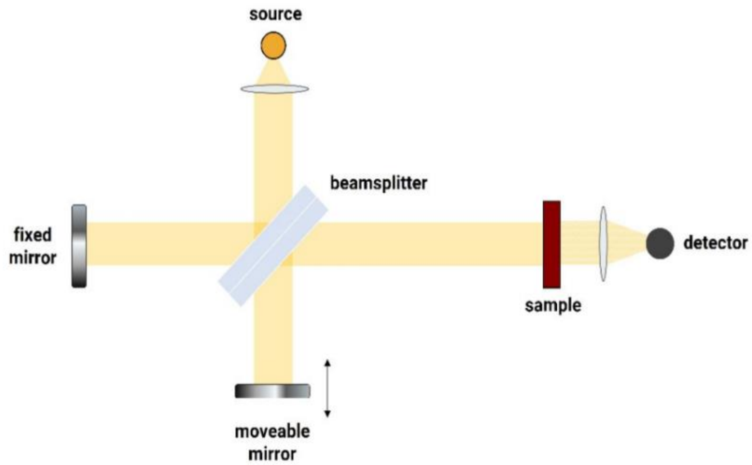
هر دو دستگاه طیف‌سنجی IR و طیف‌سنج مادون قرمز تبدیل فوریه (FT-IR)[1] دارای کاربرد وسیعی برای تشخیص ساختار مولکولی ترکیبات و آنالیز نمونه‌ها می‌باشند. در حقیقت، دستگاه FTIR نوعی سیستم پیشرفته از دستگاه ساده طیف‌سنج IR است که می‌تواند جذب انرژی توسط ترکیب را با استفاده از دستگاه Interferometer به جای تک‌فام‌ساز، در عرض چند ثانیه اسکن کند. به‌طور کلی، دستگاه طیف‌سنج FT-IR به دلیل سرعت اسکن بالا، جذب بسیار زیاد و حساسیت بیشتر، معمولاً به دستگاه طیف‌سنج IR ترجیح داده می‌شود.

دستگاه FT-IR انقلابی در زمینه طیف‌سنجی IR ایجاد کرده است، به‌طوری که این تکنیک را بسیار ساده‌تر می‌سازد. دستگاه FT-IR جذب را برای هر ترکیب به‌صورت تک به تک اندازه‌گیری نمی‌کند؛ بلکه این سیستم می‌تواند جذب در تمام طول موج‌های نور را به سرعت با استفاده از دستگاه Interferometer بررسی کند. FT-IR این کار را با استفاده از تکنیکی به نام تداخل‌سنجی[2] انجام می‌دهد که از خواص امواج و نحوه تعامل آنها با یکدیگر برای دریافت اطلاعات از یک نمونه بهره می‌برد (شکل ۱۷-۶).

---

[1] Fourier transform infrared spectrometer

[2] interferometry



شکل ۱۷-۶) ساختار داخلی دستگاه FT-IR

دستگاه طیف‌سنجی FT-IR مجهز به یک قطعه به نام تداخل‌گر می‌باشد که توسط Michelson طراحی و ابداع شده است. در داخل تداخل‌سنج، پرتو IR با یک تقسیم‌کننده به دو قسمت تقسیم شده و سپس به دو آینه هدایت می‌شود که یکی از آنها ثابت و دیگری تداخل‌گر[1] متحرک است. پرتوها در همان طول موج‌های برخوردی به آینه ثابت منعکس می‌شوند، اما بخشی از آن‌ها که به آینه تداخل‌گر برخورد می‌کند، در نتیجه حرکت این آینه با هم ترکیب شده و یک طول موج جدید ایجاد می‌کنند. این فرآیند باعث می‌شود گستره طول موجی IR افزایش یابد و منجر به ایجاد اختلاف فاز بین امواج شود.

در طیف‌سنج ساده IR، شدت جذب هر فرکانس نور IR توسط نمونه نشان داده می‌شود، درحالی‌که در طیف‌سنج FT-IR، شدت جذب پرتوهای متغیر IR از سیستم تداخل‌گر[2] توسط نمونه تابعی از موقعیت آینه متحرک هستند. در موقعیت‌های مختلف، حرکت آینه و تداخل دو پرتو، طول موج‌های متفاوتی از پرتوهای IR را ایجاد می‌کنند. با توجّه به حرکت سریع آینه، نمونه در معرض پرتوهای IR با طول موج‌های مختلف قرار می‌گیرد و جذب در طول موج‌های مختلف در سیستم ثبت می‌شود.

[1] Interferometer
[2] interferometer

۶–۱–۱–۹)   کاربرد روش‌های طیف‌سنجی UV-VIS و IR در آنالیز نمونه‌های فردی شاغلین

دستگاه‌های آنالیز طیف‌سنج UV-VIS و طیف‌سنج IR جایگاه ویژه‌ای در روش‌های استاندارد سازمان‌های NIOSH و OSHA برای آنالیز نمونه‌های هوای محیط کار دارند. اهمیت این روش‌ها را می‌توان در لیست روش‌ها از سایت زیر مشاهده کرد.

https://yiqi-oss.oss-cn-hangzhou.aliyuncs.com/aliyun/900101420/solution/213549.pdf

لازم به ذکر است که روش آنالیز دستگاهی FT-IR که در یک یا دو دهه اخیر مطرح شده است، هنوز جایگاه خود را در روش‌های مصوب سازمان‌های NIOSH و OSHA پیدا نکرده است. با این حال، این روش به‌لحاظ قابلیت‌های شایان توجّه در آنالیز میست روغن‌های فلزکاری و سیلیس کریستالی در مقالات علمی مختلف مطرح شده است. نویسنده کتاب، چند مورد پروژه پژوهشی در این زمینه را که برای اولین بار در ایران انجام داده است، در مثال‌های دو و سوم شرح داده است.

مثال نخست: روش آنالیز کروم شش ظرفیتی به روش طیف‌سنجی نوری مرئی

روش طیف‌سنجی نوری مرئی برای آنالیز ترکیب کروم شش‌ظرفیتی به کار می‌رود. این مثال مربوط به یک پروژه پژوهشی است که در زمینه آبکاری کروم در یکی از صنایع انجام شده است. این پروژه با عنوان "امکان سنجی پایش بیولوژیکی آبکاران کروم از طریق اندازه‌گیری ترکیب مالون دی‌آلدئید[1] در سرم خون آنان" انجام شده بود (Golbabaie, 2007). در ابتدا میزان مواجهه شغلی آبکاران با کروم شش ظرفیتی با استفاده از روش سازمان NIOSH به شماره ۷۶۰۰ اندازه‌گیری گردید. پس از تعیین مواجهه شغلی آبکاران با کروم شش ظرفیتی، ترکیب مالون دی‌آلدئید به‌عنوان بیومارکر استرس اکسیداتیو در سرم خون آبکاران اندازه‌گیری شد. در این مطالعه سطح مالون دی‌آلدئید سرم خون آبکاران با جمعیت کنترل بدون مواجهه فعال با کروم شش ظرفیتی، تفاوت

[1] Malondialdehyde

معنی‌دار آماری (P< ۰.۰۰۱) داشت و همچنین میان میزان مواجهه آبکاران با کروم شش ظرفیتی و سطح مالون دی‌آلدئید سرم خون یک ارتباط رگرسیونی معنی‌دار وجود داشت (P< ۰.۰۰۱، Spearman's p= ۰.۸۰۶).

در این مطالعه روش طیف‌سنجی سازمان NIOSH به شماره ۷۶۰۰ برای اندازه‌گیری کروم شش ظرفیتی مورد استفاده قرار گرفت. بر اساس مطالعه یاد شده، نمونه‌برداری از سه گروه آبکاران در مواجهه با کروم به تعداد ۹۰ نفر و یک گروه کنترل به تعداد ۳۰ نفر با استفاده از کاست هد نمونه‌برداری polystyrene و فیلتر PVC با تخلخل ۰.۵ µm و قطر ۳۷ mm متصل به پمپ SKC با گذر حجمی ۲ L/min به مدت زمان ۲۴۰ دقیقه نمونه‌برداری انجام شد. بعد از پایان نمونه‌برداری، به‌منظور آنالیز نمونه‌ها، فیلترها از هد نمونه‌بردار خارج گردید و کروم شش ظرفیتی از روی فیلترها توسط اسید سولفوریک ۰.۵ N استخراج گردید. بعد از دو بار شستشوی فیلتر با استفاده از محلول اسید سولفوریک، فیلتر از محلول با انبرک برداشته می‌شود. سپس به محلول استخراج شده معرف Diphenylcarbazide به حجم ۰.۵ ml اضافه می‌شود و حجم کل نمونه به ۲۵ ml رسانده می‌شود. نمونه خوب تکان داده شد و بعد از تشکیل رنگ بنفش (حدود دو دقیقه) محلول در بازه ۴۰ دقیقه در کووت دستگاه طیف‌سنج وارد گردیده وکروم شش ظرفیتی محلول در آب توسط دستگاه طیف‌سنج (Cecil 2041) اندازه‌گیری شد. لازم به‌ذکر است که میزان جذب کمپلکس کروم شش ظرفیتی و معرف Diphenylcarbazide نمونه‌های مورد و شاهد از طریق نمونه‌های استاندارد به‌شرح زیر اندازه‌گیری و بر حسب mg/m^3 بیان گردید.

۱- ساخت نمونه‌های استاندارد به‌طور روزانه در دامنه جرمی ۰.۲ µg تا ۷ و در حجم ۲۵ میلی‌لیتر

۲- پیپت نمودن ۰.۷ الی ۰ میلی‌لیتر به بالن ژوژه‌های ۲۵ میلی‌لیتری از محلول استاندارد مادر کروم شش ظرفیتی به غلظت ۱۰ µg/mL

۳- اضافه نمودن ۰.۵ ml معرف Diphenylcarbazide به هر بالن ژوژه

۴- به حجم ۲۵ میلی‌لیتر رساندن بالن ژوژه‌ها با اسید سولفوریک ۰.۵ نرمال

۵- مقدار جرمی هفت نمونه استاندارد (۰.۱، ۰.۲، ۰.۳، ۰.۴، ۰.۵، ۰.۶ و ۰.۷ میلی‌لیتر از نمونه استاندارد مادر) با یک نمونه شاهد (۰ میلی‌لیتر) به ترتیب برابر است با ۱، ۲، ۳، ۴، ۵، ۶ و ۷ میکروگرم بر نمونه استاندارد و برای شاهد صفر میکروگرم بر نمونه

۶- دستگاه اسپکتروفتومتر برای جذب در ۵۴۰ نانومتر تنظیم شد.

۷- جذب نمونه شاهد حاوی اسید سولفوریک ۰.۵ نرمال در میزان صفر تنظیم شد.

نمونه‌های استاندارد، به‌طور جداگانه به داخل کووت دستگاه ریخته شدند و میزان جذب از کم به زیاد اندازه‌گیری شد. خط کالیبراسیون در دامنه میزان جرمی ۰ الی ۷ میکروگرم بر نمونه ترسیم شد (حداقل ضریب رگرسیون خط کالیبراسیون در میزان ۰.۹۹۵ قابل قبول است).

۸- پس از رسم خط کالیبراسیون و به‌دست آوردن فرمول خط در نرم‌افزار EXCEL، جذب نمونه یا نمونه‌های مورد نظر به حجم ۲۵ میلی‌لیتر، به‌طور جداگانه در دستگاه طیف‌سنج نوری اندازه‌گیری شد و با توجّه به میزان جذب و خط کالیبراسیون، میزان جرم نمونه محاسبه شد.

* در صورتی‌که نمونه مورد دارای جذبی بیشتر از بالاترین نمونه استاندارد باشد، آن نمونه می‌بایست یک یا چند مرتبه با اسید سولفوریک ۰.۵ N رقیق سازی گردد).

* طیف‌سنج نوری مناسب می‌بایست برای نمونه استاندارد ۱.۵ Cr(VI)/۲۵ ml جذب ۰.۲ را نشان دهد.

۹- غلظت کروم شش ظرفیتی بر حسب میلی‌گرم بر متر مکعب از طریق فرمول زیر محاسبه می‌گردد:

$$C=\frac{W-B}{V}$$

که در آن:

W= بر حسب میکروگرم جرم کروم شش ظرفیتی در نمونه‌های مورد
B= جرم کروم شش ظرفیتی در نمونه‌های شاهد بر حسب میکروگرم
V= حجم هوای نمونه‌برداری شده بر حسب متر مکعب
C= غلظت ترکیب کروم شش ظرفیتی بر حسب میلی‌گرم بر متر مکعب

مثال دوم: آنالیز سیلیس کریستالی به روش طیف‌سنجی FT-IR

این مثال مربوط به یک پروژه پژوهشی در کارکنان بخش ساختمان‌سازی با عنوان "ارزشیابی مواجهه شغلی کارگران ساختمانی با گرد و غبار سیلیس و اختلالات احتمالی عملکرد ریوی آنان" بود. در این پروژه، روش FT-IR برای آنالیز سیلیس کریستالی[1] مورد استفاده قرار گرفت و همزمان اعتبارسنجی گردید. برای اطلاعات بیشتر، توصیه می‌شود مقاله منتشر شده توسط آذری و همکاران مطالعه شود. (Tavakol, 2017).

در این روش، نمونه‌برداری فردی به‌صورت استنشاقی از گرد و غبار هوا در منطقه تنفسی کارگران انجام گردید. پس از نمونه‌برداری، به هر فیلتر ۳۰۰ میلی‌گرم بروميد پتاسیم (KBr) در ظرف بوته آزمایشگاهی اضافه شد و سپس در کوره الکتریکی حرارت داده شد. دما به آرامی در یک پروسه چهار ساعته به ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد رسید. پس از سرد شدن کوره، محتویات بوته برای هر نمونه به هاون مخصوص ساخته شده از عقیق منتقل گردید و با استفاده از دسته هاون، مواد به‌طور کامل مخلوط و هموژنیزه شد. سپس با استفاده از دستگاه پرس و فشار ۲۰ مگاپاسکال، نمونه پودری توسط قالب ویژه‌ای به قرصی با قطر ۱۳ میلی‌متر تبدیل شد. لازم به ذکر است که نمونه‌های استاندارد به‌صورت قرص‌هایی با قطر ۱۳ میلی‌متر با استفاده از روش ۷۶۰۲ سازمان NIOSH به شرح زیر تهیه گردید:

۱- حداقل ۶ استاندارد سیلیس کریستالی با دانه‌بندی ریز استنشاقی (Respirable Crystaline Silica) با تأییدیه سازمان National Institute of Standards and Technology استفاده شود.

۲- نمونه‌های سیلیس کریستالی در دامنه وزنی ۱۰ الی ۲۰۰ میکروگرم و با دقّت یک میکروگرم توزین شوند.

۳- ذرات سیلیس کریستالی توزین شده (۱۰، ۳۰، ۵۰، ۸۰، ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ میکروگرم) به ۳۰۰ میلی‌گرم از پودر KBr که از قبل وزن شده است، اضافه می‌شود. سپس پس از هموژنیزه‌سازی نمونه‌ها در هاونی از جنس عقیق، در داخل قالب‌های ویژه و زیر پرس به قرص‌هایی با قطر ۱۳ میلی‌متر تبدیل می‌شوند.

[1] Polymorphous Silica

۴- جذب نمونه‌های استاندارد (قرص‌های تهیّه شده در مرتبه قبلی) با استفاده از طیف‌سنج FTIR (مدل WQF-510A) در محدوده عدد موجی ۴۰۰ cm^{-1} الی ۴۰۰۰ اسکن شدند و میزان جذب قرص‌های سیلیس کریستالی در دامنه عدد موجی ۷۱۰-۸۲۵ cm^{-1} تعیین گردید.

۵- بررسی اعتبار روش آنالیز دستگاهی FT-IR، با یک روش مرجع مقایسه شد که در آن از ترکیبی از روش‌های آنالیز فلورسانس پرتو ایکس (XRF)[1] و پراش اشعه ایکس (XRD)[2] استفاده شد برای این منظور از دو دستگاه XRD (PW1800, Philips Co.) برای تشخیص کیفی سیلیس کریستالی و دستگاه XRF (PW1480, Philips Co.) برای تشخیص کمّی استفاده شد.

۶- دو سری نمونه‌های استاندارد یکسان به روش FT-IR و روش دوم ترکیبی از دو روش آنالیز دستگاهی XRD و XRF توسط نمودار Bland-Altman مورد بررسی قرار گرفت. از آنجایی که تفاوت‌های دو دسته از نمونه‌ها در محدوده ۰.۲±SD از میانگین تفاوت‌ها بود، توافق داده‌های دو مجموعه نمونه‌ها تائید شد (ICC، ۰.۹۹۳؛ ۰.۰۰۱ >P).

۷- بعد از آنالیز نمونه‌های استاندارد در دامنه ۱۰ الی ۲۰۰ میکروگرم بر نمونه و محاسبه فرمول خط کالیبراسیون و ضریب رگرسیون r^2، میزان سیلیس کریستالی در نمونه‌های مورد تعیین شدند.

۸- غلظت یا تراکم سیلیس کریستالی در هوای محیط کار با فرمول زیر محاسبه گردید:

تراکم سیلیس کریستالی $C = [W_s / V], mg/m^3$

که در آن:

W_s= وزن سیلیس کریستالی برحسب µg

V= حجم هوای نمونه‌برداری برحسب m^3

[1] X-Ray Fluorescence

[2] X-Ray Diffraction

مثال سوم: آنالیز میست روغن‌های معدنی به روش FT-IR

سازمان NIOSH دو روش برای آنالیز روغن‌های معدنی[1] به‌صورت خالص و بدون آب روش ۵۰۲۶ و روغن‌های معدنی همراه با آب به روش ۵۵۲۴ را ارائه نموده است. روش اولی با جذب IR گروه‌های عاملی روغن انجام می‌شود و روش دومی شامل وزن‌سنجی همراه با شستشوی فیلتر با حلال سه‌گانه برای برداشتن روغن نمونه‌برداری شده از روی فیلتر است که در این روش وزن نمونه با تفاضل وزن نمونه قبل و بعد از شستشو با حلال سه‌گانه محاسبه می‌شود.

روش شماره ۵۰۲۶ سازمان NIOSH با استفاده از دستگاه طیف‌سنجی IR انجام می‌شود که متأسفانه اطلاعات لازم را برای ارزشیابی مواجهه شغلی با میست روغن را فراهم نمی‌کند زیرا استاندارد میست روغن معدنی در کتابچه استاندارد ACGIH برای دو نوع روغن تمیز تصفیه شده ($TLV= ۵\ mg/m^3$) و روغن کارکرده و تصفیه نشده به‌عنوان عامل سرطان‌زای کلاس A2 (کمترین غلظت ممکنه با نماد L) ارائه شده است و مشکل اساسی روش ۵۰۲۶ عدم تشخیص روغن تمیز از روغن کثیف است. متأسفانه روش ۵۵۲۴ که روش مدرن‌تر و پیشرفته‌ای است در ایران به لحاظ نبود ترازوی با حساسیت ۰.۰۰۱ mg و همچنین نبود حلال‌های متانول، تولوئن و دی‌کلرومتان با کیفیت (درجه خلوص ۹۹.۹۹٪ برای آزمایشات تجزیه شیمیایی) قابل اجرا نیست.

از دو روش یاد شده، روش شماره ۵۰۲۶ با شرایط آزمایشگاه‌های ایران سازگارتر است. در پروژه‌های پژوهشی آذری و همکاران، روش ارتقا یافته ۵۰۲۶ استفاده شده است (Rafieepour, 2018). منظور از ارتقای روش به مفهوم کاربرد آنالیز دستگاهی FT-IR به‌عوض دستگاه طیف‌سنجی IR ساده است. همان‌طور که قبل‌تر اشاره شد، روش آنالیز دستگاهی FT-IR دارای مزیت‌های خاص در زمینه حساسیت بیشتر و اسکن سریع نمونه و آنالیز هم‌زمان آنالیت‌های موجود در روغن تصفیه نشده از قبیل فرمالدئید و ترکیبات نیتروزوآمین در نمونه‌ها برای تشخیص نوع روغن و ارزشیابی مواجهه شاغلین برای مقایسه با استاندارد تماس شغلی است.

[1] Mineral Oil

شرح مختصر روش ارتقا یافته روش ۵۰۲۶ به شرح زیر است:

۱- نمونه‌برداری با کاست دو قطعه‌ای ۳۷ میلی‌متری و یا ترجیحاً با فیلتر هولدر IOM به قطر ۲۵ میلی‌متر مجهز به یکی از فیلترهای PVC با تخلخل ۰.۸ µm، MCE با تخلخل ۵ µm، PTFE با تخلخل ۲ µm و یا فیلتر فایبرگلاس، با گذر حجمی ۱ الی ۳ لیتر در دقیقه به حجم ۲۰ الی ۵۰۰ لیتر متناسب با تراکم میست روغن معدنی در هوای محیط انجام می‌شود (در شرایط تراکم زیاد برای پیشگیری از اشباع فیلتر، حجم کمتری با مدت‌زمان ثابت نمونه‌برداری می‌شود).

۲- فیلتر نمونه‌برداری شده و فیلتر شاهد با یک انبرک در یک ویال قرار داده می‌شود و حلال CCl_4 به حجم ۱۰ میلی‌لیتر در ویال‌ها برای استخراج روغن معدنی از فیلتر ریخته می‌شود. لازم به‌ذکر است که حلال CCl_4 سرطان‌زای کلاس A2 و بسیار سمی برای کبد است و با توجّه به کاربرد موفق حلال CH_2Cl_2 به‌عوض CCl_4 در پروژه‌های پژوهشی آذری و همکاران، توصیه می‌شود که حلال CH_2Cl_2 جایگزین CCl_4 شود.

۳- در مرتبه بعدی برای ساخت نمونه‌های استاندارد لازم است، ۵ الی ۱۰ میلی‌لیتر از روغن استفاده شده از فرایند صنعتی تراشکاری در محل کار تهیّه شود.

۴- برای ساخت محلول‌های استاندارد (حداقل شش مورد و به‌طور روزانه) یک میلی‌لیتر روغن می‌بایست با ترازو با حساسیت اندازه‌گیری ۰.۰۱ میلی‌گرم توزین شود و پس از به دست آوردن وزن مخصوص روغن، با میکروپیپت از روغن رقیق‌سازی شده توسط حلال CH_2Cl_2، مقادیر معینی به ویال‌های حاوی حلال افزوده شود و غلظت نمونه‌های استاندارد روغن معدنی در دامنه ۵ الی ۲۵۰ میکروگرم در میلی‌لیتر ساخته شوند.

۵- نمونه استاندارد در کووت دستگاه طیف‌سنج ریخته شده و جذب روغن در دامنه عدد موجی cm^{-1} ۳۲۰۰ الی ۲۷۰۰ اسکن شود.

۶- بهترین طول موج (برای مثال ۲۹۴۰ cm^{-1}) برای جذب روغن بر اساس ساختار شیمیایی خاص هر روغن به‌دست آورده شود.

۷- سپس فرمول و ضریب r^2 خط کالیبراسیون (حداقل ضریب r^2 قابل قبول معادل ۰.۹۹۵ است) برای نمونه‌های استاندارد برحسب میکروگرم بر میلی‌لیتر و عدد جذب IR، با استفاده از نرم‌افزار EXCEL به‌دست آورده شود.

۸- سپس نمونه‌های مورد و شاهد به ترتیب در کووت دستگاه برای اندازه‌گیری میزان جذب، وارد گردد و بر مبنای میزان جذب، جرم نمونه‌های مورد و شاهد محاسبه شود.

۹- غلظت نمونه‌ها در هوای محیط کار از طریق فرمول زیر محاسبه می‌گردد:

$$C = \frac{W - B}{V}, mg / m^3$$

که در آن:

W= جرم روغن معدنی نمونه مورد برحسب میلی‌گرم
B= جرم روغن معدنی نمونه مورد شاهد برحسب میلی‌گرم
V= حجم هوای نمونه‌برداری شده برحسب مترمکعب
C= غلظت روغن معدنی در هوای تنفسی کارکنان برحسب میلی‌گرم بر مترمکعب

از کارهای پژوهشی آذری و همکاران در زمینه مایعات روان‌کننده[1] که مخلوطی از آب و روغن‌های معدنی برای تراشکاری فلزات می‌باشد، ابداع یک روش اندازه‌گیری مواجهه شغلی با آب‌روغن معدنی است (Kamalifar, 2019). روش توصیه شده آذری و همکاران برای مایعات فلزکاری (مخلوط آب و روغن) همانند روش ارتقا یافته ۵۰۲۶ با استفاده از آنالیز دستگاهی FT-IR است ولی با یک فرق عمده و آن خشک نمودن فیلترها در دسیکاتور برای حذف نمودن آب موجود در نمونه‌ها است که می‌تواند عامل مخدوش‌کننده آنالیز به لحاظ جذب IR توسط بخارآب باشد.

خلاصه مطالب مثال سوم: "روش آنالیز دستگاهی استفاده شده برای اندازه‌گیری میست روغن در پروژه‌های پژوهشی آذری و همکاران به‌عوض دستگاه ساده IR دستگاه FT-IR است که به‌مراتب حساسیت بالاتری داشته و

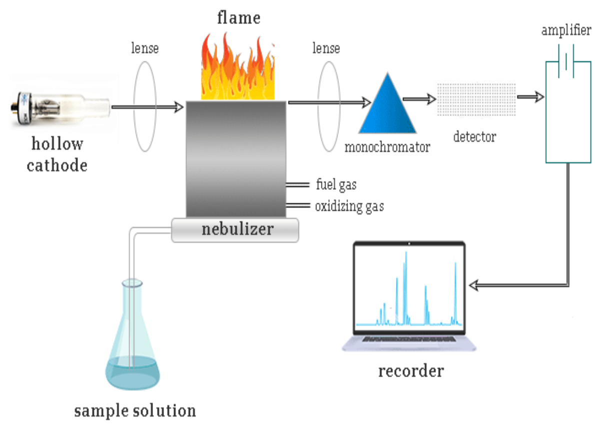
[1] Metalworking Fluids

سرعت اسکن در آن به‌مراتب بیشتر از روش ۵۰۲۶ سازمان NIOSH است. از مزیت دیگر روش آنالیز دستگاهی FT-IR امکان اندازه‌گیری ترکیبات موجود در روغن مستعمل تصفیه نشده دستگاه CNC از قبیل فرمالدئید و نیتروزآمین است. روش شماره ۵۵۲۴ که برای محاسبه تراکم روغن معدنی در مایعات روان‌کننده آب و روغن استفاده می‌شود، در سال‌های اخیر دارای محدودیت اجرایی است روش ابداع شده آذری و همکاران می‌تواند در این زمینه مفید واقع گردد.

برای توجیه اهمیت روش‌های طیف‌سنجی UV، VIS و IR در آنالیز نمونه‌ها به‌صورت مستقل یا توأم با روش‌های کروماتوگرافی، لینک شناسایی روش‌های نمونه‌برداری و آنالیز به شرح زیر برای کارشناسان محترم ارائه می‌شود.

https://yiqi-oss.oss-cnhangzhou.aliyuncs.com/aliyun/900101420/solution/213549.pdf

لازم به یادآوری است در فصل ۸ با عنوان انتخاب روش ارزشیابی مواجهه شغلی کارکنان، اهمیت روش‌های طیف‌سنجی بیشتر مورد بررسی قرار گرفته است که توجّه کارشناسان به مطالب یاد شده، جلب می‌گردد.





۶-۱-۲) طیف‌سنجی جذب اتمی

برخی از دانش‌پژوهان بر این عقیده هستند که طیف‌سنجی اتمی در سال هفدهم میلادی متولد شد، زمانی که آقای ایزاک نیوتن[۱] کشف کرد که نور را می‌توان با عبور نور از یک منشور به مجموعه‌ای پیوسته از رنگ‌ها جداسازی نمود. او این نورهای جداسازی شده به رنگ‌های مختلف را طیف[۲] نامید. تجزیه نور توسط نیوتن یک روش طیف‌سنجی نخستین و ابزار اساسی مورد استفاده در طیف‌سنجی نشر اتمی است.

به‌طورکلی طیف‌سنجی[۳] به مطالعه برهمکنش بین ماده و اشکال مختلف پرتو الکترومغناطیسی گفته می‌شود که هنگامی‌که این نظم علمی برای تجزیه‌وتحلیل کمّی ترکیب شیمیایی به‌کار برده می‌شود، از اصطلاح طیف‌سنجی برای آن استفاده می‌شود.

طیف‌سنجی اتمی[۴] شامل مطالعات طیف‌سنجی جذب اتمی (AAS)[۵]، طیف‌سنجی انتشار اتمی (AES)[۶]، طیف‌سنجی فلورسانس اتمی (AFS)[۷]، فلورسانس اشعه ایکس (XRF) و طیف‌سنجی جرمی ترکیبات معدنی (MS)[۸] است. سیستم‌های AAS، AES و AFS از برهمکنش‌های بین پرتو مرئی و فرابنفش و الکترون‌های مداری اتم‌های آزاد شده ترکیبات فلزی و شبه‌فلزی در فاز گازی بهره می‌گیرد. در XRF، ذرات باردار پرانرژی با الکترون‌های

---

[1] Isaac Newton
[2] Spectrum
[3] Spectroscopy
[4] Atomic spectroscopy
[5] Atomic Absorption Spectroscopy (AAS)
[6] Atomic Emission Spectroscopy (AES)
[7] Atomic Fluorescence Spectroscopy (AFS)
[8] inorganic Mass Spectroscopy (MS)

پوسته داخلی اتم برخورد می‌کنند و باعث پیدایش فوتون‌های پرتو ایکس می‌شود. در MS نیز اتم‌های آنالیت یونیزه شده در یک میدان مغناطیسی با توجّه به نسبت جرم به بار مثبت (m/z) شناسایی می‌شوند.

۶-۱-۲-۱) پرتوهای تابشی (الکترومغناطیسی) و برانگیختگی عناصر فلزی و شبه‌فلزی

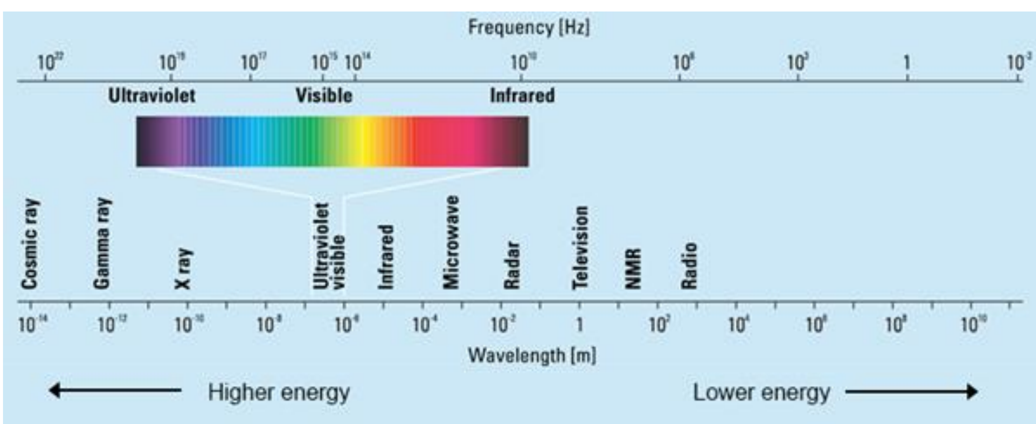
توصیف پرتوهای الکترومغناطیسی به‌صورت انرژی تشعشعی و یا پرتو تابشی راحت‌تر است و برای تشریح روشنی از فعل‌وانفعالاتی که منجر به جذب انرژی می‌شوند، بهتر است تابش را به عنوان بسته‌هایی از انرژی یا کوانتومی به نام فوتون در نظر بگیریم.

انرژی پرتو یا فوتون E به‌طور معکوس متناسب با طول موج است:

$$E = hC/\lambda$$

که در آن:

E= انرژی تابش برحسب ژول
C= برابر با سرعت نور برحسب متر بر ثانیه (3×10^8 m/s)
λ= طول موج انرژی برحسب متر
h= ضریب پلانک برحسب ژول.ثانیه (6.62×10^{-34})

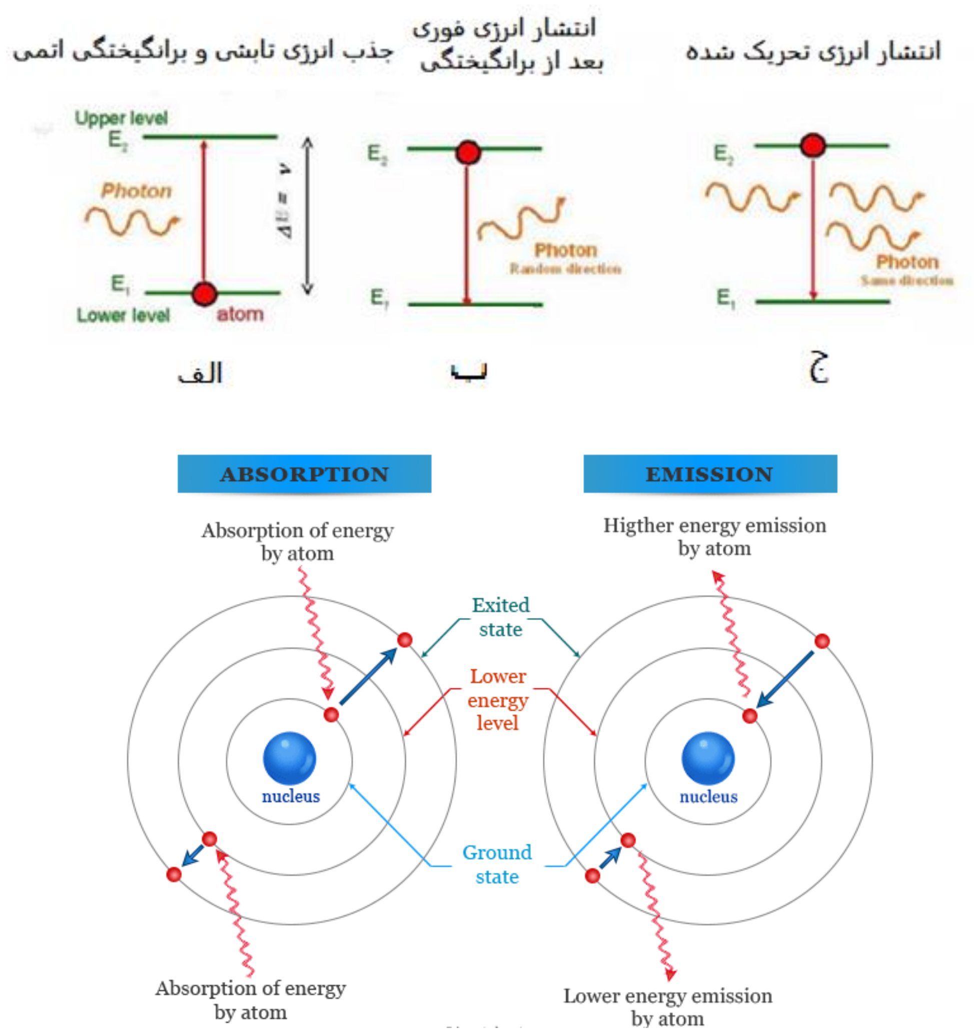


شکل ۱۸-۶) طیف پرتوهای تابشی و ارتباط معکوس انرژی تابشی و طول موج

۶-۱-۲-۲) طیف‌سنجی اتمی: اصول کلی

هر عنصر دارای یک ساختار اتمی مشخص با یک هسته کوچک با بار مثبت است که توسط تعداد کافی الکترون برای تعادل قطبیت هسته اتم احاطه شده است. الکترون‌ها در اوربیتال‌های درون اتم قرار می‌گیرند. یکی از الکترون‌ها می‌تواند با کسب انرژی لازم برانگیخته شده و از یک سطح انرژی به سطح بالاتر ارتقاء یابد (شکل ۱۹-۶). این انرژی برای برانگیختگی از برخورد اتم‌ها با یکدیگر و شعله قوی در سیستم AES، پرتوهای الکترومغناطیسی در سیستم‌های AAS و AFS، یا الکترون‌های پرانرژی در سیستم XRF تأمین می‌شود. هنگامی‌که انرژی موردنیاز به اختلاف بین دو حالت انرژی (ΔE) می‌رسد، انتقال الکترون[1] از مدارهای پایین‌تر به بالاتر امکان‌پذیر می‌شود. یک اتم خنثی ممکن است در یک پوسته با انرژی کم یا حالت پایه (E_0) یا در گروهی از حالت‌های برانگیخته (E^*) (بسته به تعداد الکترون‌هایی که به سطوح انرژی بالاتر ارتقا یافته‌اند) وجود داشته باشد. اولین انتقال برای هر عنصر دارای یک سطح انرژی منحصربه‌فرد است که به اختلاف انرژی الکترون در دولایه مرتبط است.

---
[1] Electronic Transition

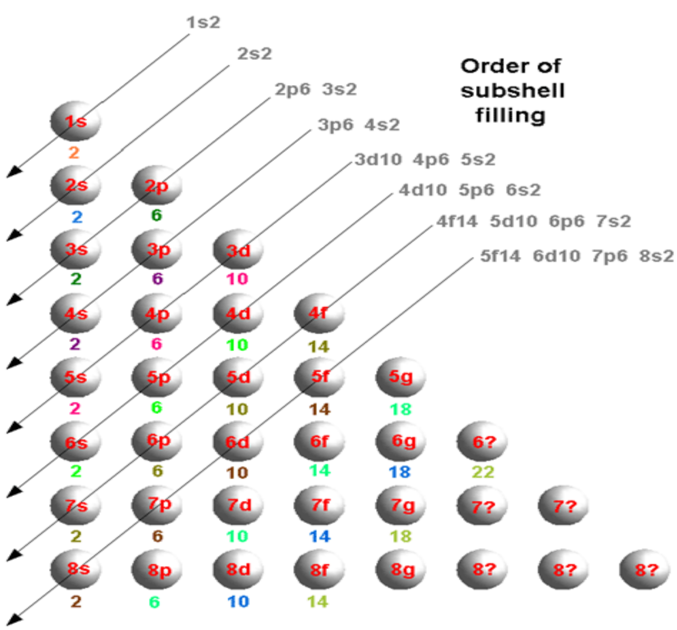


شکل ۱۹-۶) نمودارهای سطح انرژی برای نشان دادن انتقال‌های مرتبط با طیف‌سنجی (الف) جذب اتمی AAS، (ب) انتشار AES و (ج) فلورسانس یا فسفرلانس اتمی AFS

پدیده جذب انرژی تشعشعی توسط ساختار اتمی، به ساختار اوربیتالی الکترون‌های یک عنصر بستگی دارد. الکترون‌های هر عنصر با توجّه به ساختار الکترونی آن در اوربیتال‌های خاصی قرار دارند، امّا می‌توان در فرآیندی به نام برانگیختگی الکترونی، یک الکترون را به اوربیتال‌های بالاتر انتقال داد. این پدیده با پیش‌فرض مهیا شدن انرژی‌ای برابر با اختلاف انرژی بین حالت پایدار و حالت برانگیخته فراهم می‌شود. با توجّه به ناپایداری حالت‌های برانگیختگی، الکترون به‌سرعت به حالت پایه بازمی‌گردد. در فرآیندی که آرام شدن الکترون نامیده می‌شود، الکترون

برانگیخته با برگشت به حالت پایه خود، انرژی کسب‌شده را از دست می‌دهد که به عنوان انرژی انتشاری[1] تعریف می‌شود (۱۹-۶).

برای توضیح پدیده‌های مرتبط با جذب و نشر پرتوهای تابشی یا پیوست‌های مولکولی ترکیبات در ساختار اتمی عناصر از مدل رادرفورد-بوهر[2] استفاده می‌شود. یک اتم در مدل رادرفورد-بوهر دارای تعدادی لایه الکترونی با اسامی n_1، n_2، n_3 و غیره تعریف می‌شود که در آن مقادیر افزایشی n نشان‌دهنده سطوح انرژی بالاتر و فاصله بیشتر از هسته است. الکترون‌ها به دور هسته در اوربیتال‌های زیرپوسته‌ای به نام‌های s، p، d و f می‌چرخند. هر لایه از پیکربندی ساختار اتمی از زیر پوسته‌های s، p، d و f تشکیل شده است و هر لایه فرعی می‌تواند حداکثر دو الکترون را در خود جای دهد (شکل ۲۰-۶). هیچ دو الکترونی نمی‌توانند انرژی‌های یکسانی داشته باشند، امّا برای سادگی بیان ساختار اتمی، می‌توان آنها را مربوط به n پوسته‌ای که اشغال می‌کنند به‌صورت $s_۱$، $s_۲$، $p_۲$، $s_۳$، $p_۳$، $d_۳$ و غیره دسته‌بندی کرد.

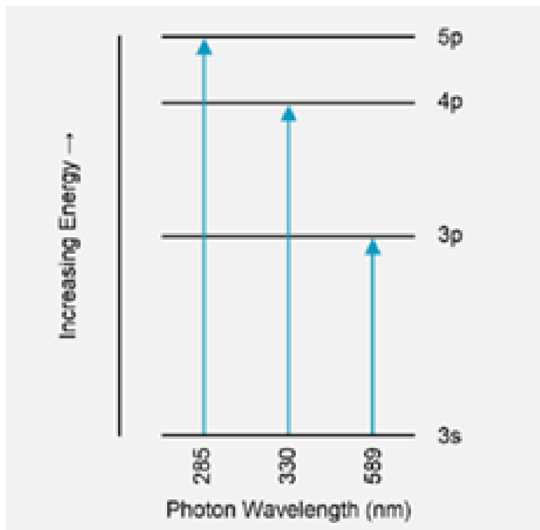


شکل ۲۰-۶) ساختار اوربیتال‌های الکترونی به نام‌های s، p، d و f بر اساس مدل رادرفورد-بوهر

[1] Emission

[2] Rutherford–Bohr

برای مثال در شکل ۲۱-۶ به برانگیختگی اتم‌های بخار سدیم اشاره شده است. برانگیختن یک الکترون، در بیرونی‌ترین لایه فرعی اتم سدیم، توسط یک فوتون در طول‌موج‌های ۵۸۹، ۳۳۰ یا ۲۸۵ نانومتر اتفاق می‌افتد که منجر به انتقال آن به حالت‌های برانگیخته متفاوت می‌شود.



شکل ۲۱-۶) چگونگی برانگیختگی عنصر سدیم با جذب انرژی فوتون در سه طول موج ۲۸۵، ۳۳۰ و ۵۸۹ نانومتر

با در نظر گرفتن اتم‌های بخار سدیم، می‌توان اثر جذب انرژی فوتون در اتم‌های سدیم را با سطح انرژی مناسب نشان داد. برانگیختگی یک الکترون، در بیرونی‌ترین لایه فرعی اتم سدیم، توسط یک فوتون در طول‌موج‌های ۵۸۹، ۳۳۰ یا ۲۸۵ نانومتر اتفاق می‌افتد و انتقال الکترونی، حالت‌های برانگیختگی متفاوتی را برای سدیم به وجود می‌آورد. بیشترین انرژی فوتون مربوط به طول موج کوتاه‌تر ۲۸۵ nm است.

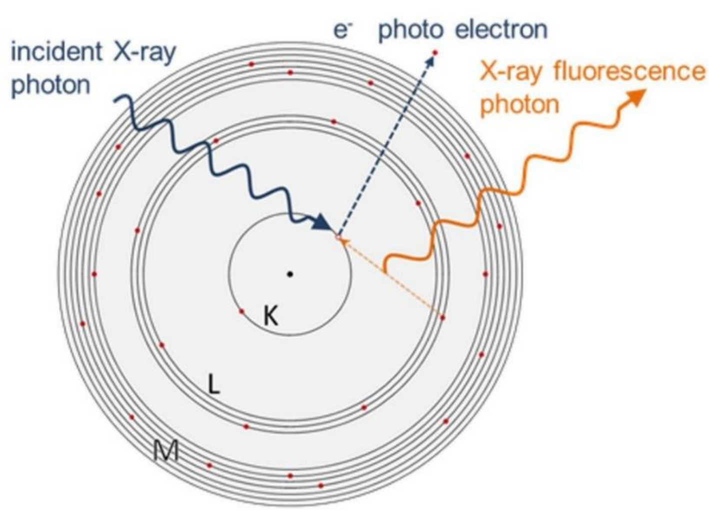
ΔE اختلاف میزان انرژی لازم برای انتقال الکترون‌ها از مدارهای پایین به بالاتر برای جذب انرژی (برانگیختگی) و یا انرژی منتشر شده در وضعیت برگشت الکترون‌ها از مدارهای بالا به مدار پایین‌تر می‌باشد که در اکثر عناصر، انرژی جذب شده یا منتشر شده در محدوده پرتوهای فرا بنفش یا مرئی است. انرژی فوتون (E) با معادله زیر محاسبه می‌شود:

$$E=hc/\lambda$$

هنگامی که نور با طول موج خاصی وارد یک سیستم آنالیز دستگاهی می‌شود، الکترون‌های لایه بیرونی اتم‌های عناصر فلزی، با جذب انرژی برانگیخته می‌شوند. در نتیجه، مقدار پرتو منتقل شده از سیستم به آشکارساز کاهش می‌یابد، این مسئله به‌عنوان پدیده جذب اتمی در عملکرد سیستم طیف‌سنجی AAS استفاده می‌شود (شکل ۱۹-۶).

تحت شرایط مناسب، الکترون‌های لایه بیرونی اتم‌ها در فاز گازی شکل، ممکن است با حرارت دادن برانگیخته شوند. با بازگشت این الکترون‌ها به حالت پایه، انرژی منتشر می‌شود که مقداری از این انرژی به‌صورت نور می‌باشد که می‌توان آن را در یک آشکارساز اندازه‌گیری کرد. این پدیده مکانیسم عمل در سیستم طیف‌سنجی انتشار اتمی AES است (شکل ۱۹-۶).

وقتی فوتون‌های پرانرژی به اتم‌های عناصر برخورد می‌کنند، می‌تواند باعث برانگیختگی اتمی شده و الکترون لایه داخلی اتم را به بیرون از اتم پرتاب کند و در این وضعیت جای خالی اوربیتال داخلی می‌تواند توسط یک الکترون پوسته بیرونی پر شود. این وضعیت انتقالی، عامل انتشار یک فوتون ایکس است. این فرآیند فلورسانس اشعه ایکس (XRF) نامیده می‌شود (شکل ۲۲-۶)

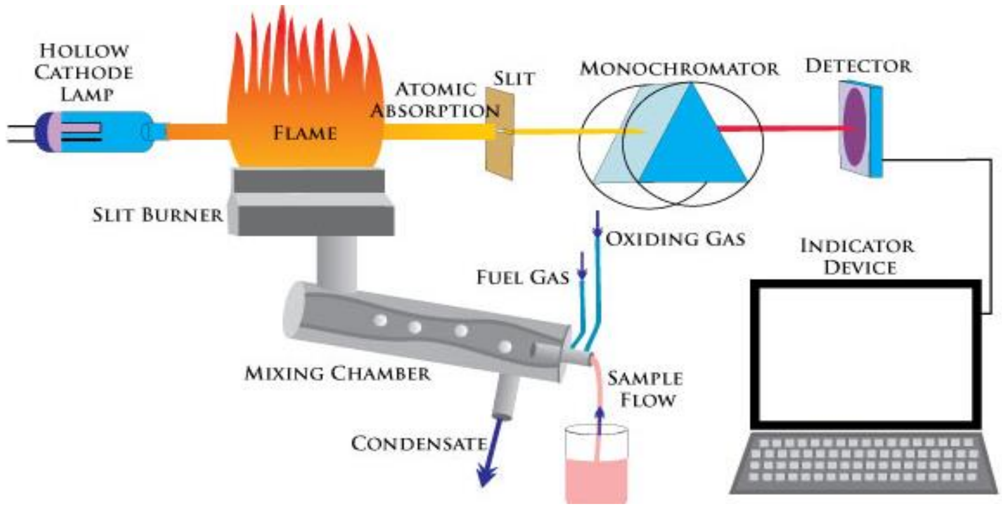


شکل ۲۲-۶) انتقال الکترونی همراه با آزادسازی پرتو X و ایجاد پدیده فلورسانس

انرژی جذب شده یا منتشر شده با طول موج خاص، مشخصه هر اتم یا عنصر است که از آن سرچشمه گرفته است درحالی‌که شدت انتشار مربوط به غلظت اتم‌ها در نمونه است. ازآنجایی‌که سیستم‌های آنالیز دستگاهی طیف‌سنجی جذب و نشر اتمی بیشترین کاربرد را در آزمایشگاه‌های شیمی برای آنالیز نمونه‌های هوای محیط کار دارد، جنبه‌های کاربردی دو روش دستگاهی طیف‌سنجی جذب و نشر اتمی در این فصل مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۶-۱-۲-۳) روش آنالیز طیف‌سنجی جذب اتمی

آنالیز عناصر فلزات در مقادیر بسیار کم به‌عنوان مواد متشکله آلیاژها و یا در نمونه‌های آب، هوا و مواد غذایی از قدیمی‌ترین موضوعات کاربرد علم شیمی بوده است. طیف‌سنجی جذب اتمی به‌صورت اختصار AAS گفته می‌شود. در این روش عناصر فلزی و شبه‌فلزی با جذب انرژی، برانگیخته می‌شوند که میزان جذب انرژی در هر عنصر متناسب با ساختار اتمی آن عنصر بود. لازم به‌ذکر است که طول موج جذب برای عناصر با یک یا دو استثنا به‌صورت اختصاصی هستند. در مرحله اول از روش طیف‌سنجی جذب اتمی برای ترکیبات مختلف، می‌بایست آن ترکیب در فاز مایع آماده‌سازی شود و سپس در دستگاه به‌صورت ذرات ریز افشانه و در کوره یا مشعل سیستم، اتمیزه شود و سپس توسط انرژی تشعشعی برانگیخته شده و میزان و طیف جذب انرژی توسط عناصر اندازه‌گیری گردد (شکل ۲۳-۶). روش‌های طیف‌سنجی جذب اتمی مشابه با اسپکتروفتومتر نوری از قانون لامبرت و بیر تبعیت می‌نمایند.



شکل ۲۳-۶) اجزای سیستم طیف‌سنجی جذب اتمی

طیف‌سنجی میزان جذب انرژی تشعشعی توسط اتم‌های عناصر فلز و شبه‌فلز به‌صورت ابتدایی در اوایل قرن بیستم مطرح گردید و روش‌های مدرن امروزی طیف‌سنجی جذب اتمی مدیون تلاش‌های دانشمندان شیمی و فیزیک با رهبری Alan Walsh در کشور استرالیا در سال ۱۹۵۵ است. موفقیت این دانشمندان برای آنالیز عناصر فلزی با ابداع لامپ‌های هالوکاتد[1] به‌عنوان منبع انرژی تشعشعی قوی برای برانگیختگی عناصر مختلف و همچنین ساخت مشعل‌های قوی برای اتمیزه نمودن ترکیبات فلزی میسر شد.

۶-۱-۲-۴) محدودیت‌های روش طیف‌سنجی جذب اتمی

دستگاه اولیه جذب در زمان خود اکتشاف بسیار جالب و مفیدی بود ولی محدودیت‌هایی به شرح زیر داشت:

- **شعله[2] حاصل از سوخت استیلن و اکسیژن در بخشی به‌نام مشعل، عامل اتمیزه شدن جزئی از آنالیت تزریق شده به دستگاه است. ازاین‌رو حساسیت سیستم در حد قسمت در میلیون (ppm)[3] برای نمونه‌های آماده‌سازی شده در فاز مایع است و قادر به اندازه‌گیری غلظت‌های کمتری از فلزات نیست.**
- **حساسیت این دستگاه به لحاظ وجود مداخله‌گرها و کاهش احتمال اتمیزه شدن نمونه‌ها در شعله، پاسخگوی سؤالات علمی سم‌شناسی نبود.**

[1] Hallow Cathode
[2] Flame
[3] Part Per Million

- **آنالیز نمونه‌ها فقط به شکل مایع و عاری از مواد آلی می‌بایست انجام شود و در نتیجه برای اندازه‌گیری جذب اتمی نمونه‌های جامد می‌بایست ابتدا آنها را با هضم اسیدی یا قلیایی آماده‌سازی نمود.**
- **آنالیز هم‌زمان عناصر امکان‌پذیر نیست و در زمان‌های مختلف باید انجام شود.**

۶-۱-۲-۵) روند پیشرفت دستگاه طیف‌سنجی جذب اتمی در دهه‌های اخیر

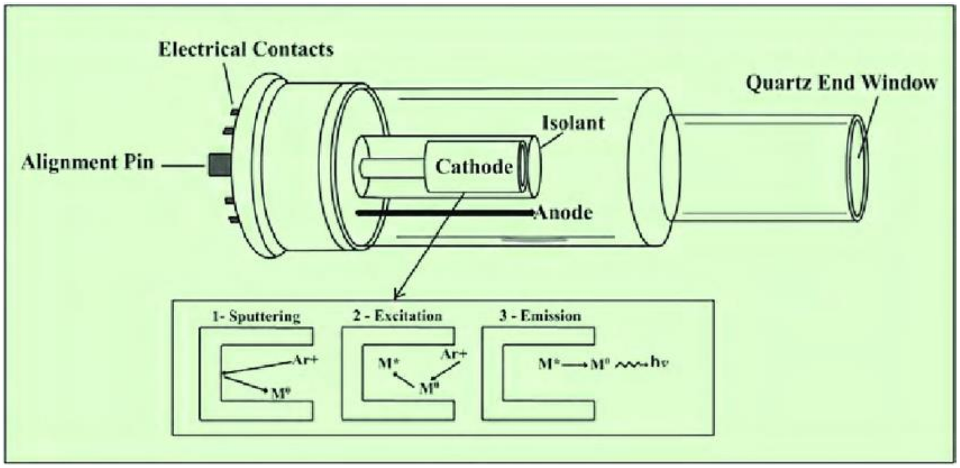
سیر تکاملی دستگاه طیف‌سنج اتمی قابل توجّه است. دستگاه‌های ساخته شده در دو دهه اخیر دارای قابلیت آنالیز عناصر فلزی و شبه‌فلزی نمونه‌های آب، هوا، خاک و مواد غذایی آماده‌سازی شده در مایعات را در تراکم‌های کمتر و در حد قسمت در بیلیون (ppb)[1] دارند. برای تشریح دستگاه طیف‌سنج اتمی و روند پیشرفت آن، اجزای سیستم در ادامه ارائه می‌شود و در خلال مطالب بخش‌های بهینه شده توضیح داده خواهد شد.

۶-۱-۲-۶) اجزای سازنده سیستم آنالیز دستگاهی جذب اتمی

۶-۱-۲-۶-۱) منبع انرژی تشعشعی لامپ هالو کاتد

لامپ کاتدی به‌طورمعمول برای تولید انرژی در دستگاه‌ها استفاده می‌شود و به‌طورمعمول برای آنالیز هر عنصر، لامپ خاصی استفاده می‌شود که جنس کاتد آن دقیقاً مطابق با عنصر موردنظر برای آنالیز است. سیستم‌های آنالیز دستگاهی می‌بایست مجهز به چند لامپ کاتدی باشند که برای هر مورد تجزیه تعویض شوند. لامپ‌هالوکاتد همان‌طور که در شکل ۶-۲۴ نشان داده شده است، از یک حباب شیشه‌ای از جنس کوارتز ساخته شده است که با یک گاز خنثی از قبیل آرگون پر می‌شود. اختلاف پتانسیل بین آند و کاتد لامپ باعث یونیزه شدن اتم‌های گاز آرگون و برخورد به سطح کاتد شده و اتم‌های کاتد در لامپ به بیرون پرتاب می‌شوند. برخورد اتم‌های عنصر فلزی کاتدی با یکدیگر و گاز خنثی باعث برانگیخته شدن آنها و انتشار انرژی تشعشعی خاصی برای جذب عنصر هدف می‌شود.

---
[1] Part Per Billion

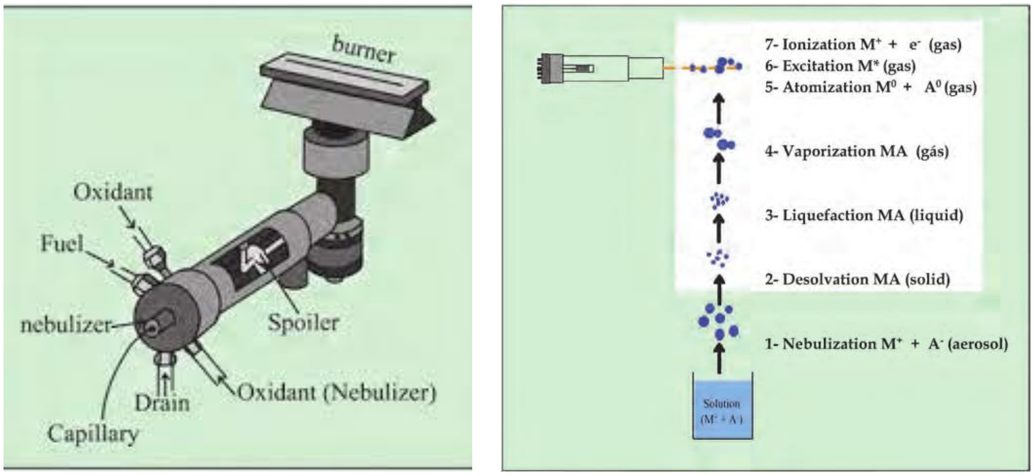


شکل ۲۴-۶) ساختار لامپ هالوکاتد به‌عنوان منبع تولیدکننده پرتو تابشی برای عناصر مختلف

۶-۱-۲-۶-۲) دستگاه اتمیزه‌کننده

سیستم اتمیزه‌کننده در طیف‌سنج جذب اتمی نقش بسیار مهمی دارد زیرا فقط اتم‌های عناصر می‌توانند جاذب انرژی تشعشعی باشند. ازاین‌رو نمونه‌های آب، خاک و هوا در مرحله نخست می‌بایست هضم اسیدی یا قلیایی شده و به‌صورت نمونه مایع آماده‌سازی و سپس با اسپری آن در شعله یا کوره اتمیزه شوند. سیستم اتمیزه‌کننده نمونه‌ها در دستگاه‌های طیف‌سنج جذب اتمی اولیه، شامل دستگاه نبولایزر[۱] و مشعل است. سیستم نبولایزر یا مه‌پاش، نمونه مایع را به‌صورت ذرات بسیار ریز وارد مشعل می‌نماید. مشعل در سیستم‌های اولیه با مخلوطی از استیلن و هوا یا مخلوط استیلن و نیتروز اکساید کار می‌کرد. نمونه‌های تزریق شده توسط حرارت مشعل در مرتبه نخست خشک و سپس تبخیر و نهایتاً به اتم‌های سازنده خود تفکیک می‌شدند (شکل ۲۵-۶).

---
[1] Nebulizer



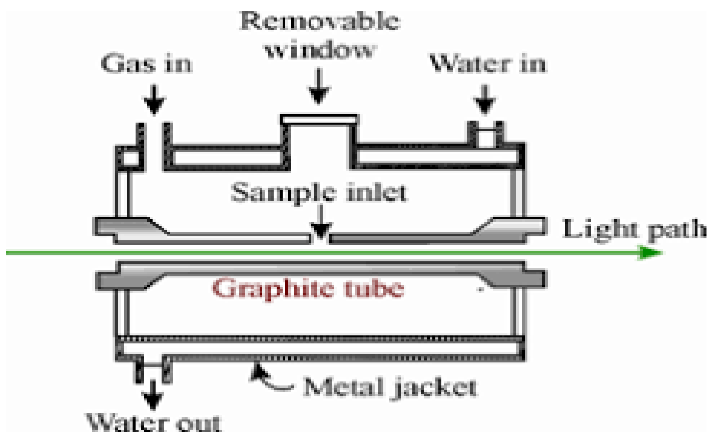
شکل ۲۵-۶) ساختار دستگاه اتمیزه‌کننده نمونه‌ها و فرایند اتمیزه شدن ترکیبات در فرایند حرارتی

فرایند تغییر نمونه تزریق شده و اتمیزه‌کننده ترکیبات

همان‌طور که در شکل شماره۶-۲۵ نشان داده می‌شود، نمونه پس از کشیده شدن در حرارت مشعل، خشک، تبخیر و در نهایت اتمیزه می‌شود. عناصر اتمیزه شده پس از جذب انرژی تشعشعی با طول موج مشخصی متناسب با لامپ‌هالوکاتد، برانگیخته می‌شوند. میزان جذب انرژی بر اساس قانون لامبرت و بیر، متناسب با تراکم نمونه است. جذب انرژی در مراتب بعدی توسط فتوسل اندازه‌گیری می‌شود. در فرایند برانگیخته شدن عناصر در فاز گاز امکان یونیزه شدن اتم‌ها وجود دارد. برای برطرف نمودن فرایند یونیزه شدن که به نفع حساسیت آنالیز عناصر نیست از عناصر اهدا کننده الکترون مانند ترکیبات Cs، K، Na و Rb استفاده می‌شود که باعث کاهش یا سرکوب یونیزاسیون عناصر هدف برای آنالیز می‌شود (توضیحات بیشتر در روش‌های آنالیز ترکیبات فلزی ارائه خواهد شد).

سیستم مشعل دستگاه‌های اولیه طیف‌سنج جذب اتمی بسیار ساده و ارزان است ولی از طرفی سیستم یاد شده در قیاس با سیستم کوره گرافیتی، دارای راندمان کمتری برای اتمیزه نمودن نمونه تزریق شده به دستگاه است. دستگاه جذب اتمی مجهز به گروه گرافیتی دارای حساسیت بیشتر برای آنالیز نمونه‌های هوای محیط کار یا اندازه‌گیری نمونه‌های بیولوژیکی است. ازاین‌رو در سیستم‌های مدرن‌تر طیف‌سنج اتمی از کوره گرافیتی استفاده می‌شود. آنالیز عناصر فلزی با دستگاه جذب اتمی مجهز به کوره گرافیتی، سیستم دستگاهی جذب اتمی را متحول

نمود. در سیستم‌های مجهز به کوره گرافیتی، اتمیزه شدن نمونه‌ها بدون شعله و در یک تیوپ گرافیتی با استفاده از نیروی الکتریسیته انجام می‌شود. در کوره با برقراری قوس الکتریکی حرارت بسیار زیادی تا حدود ۳۵۰۰ درجه سانتی‌گراد تولید می‌شود (شکل ۲۶-۶). نمونه‌های آماده شده در حجم حداکثر ۱۰۰ میکرولیتر به داخل دستگاه تزریق می‌شود. آنالیت در اثر فرایند حرارتی داخل کوره با راندمان بیشتری در مقایسه با سیستم مشعل، تبدیل به فاز گاز و نهایتاً اتمیزه می‌شوند و پرتو تابشی تک‌فام ورودی به کوره را جذب می‌نماید. نهایتاً میزان جذب انرژی تشعشعی در آشکارساز سیستم اندازه‌گیری می‌گردد.



شکل ۲۶-۶) سیستم پیشرفته اتمیزه‌کننده ترکیبات در کوره گرافیتی

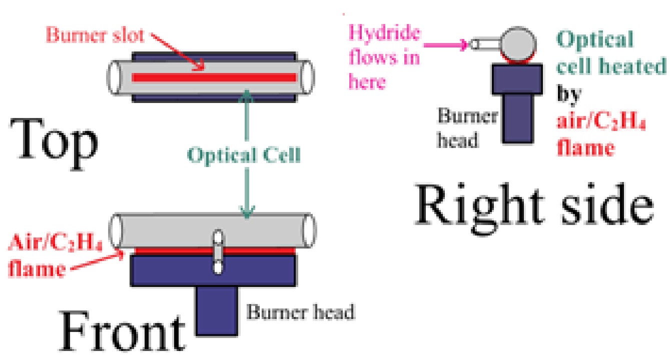
مکانیزم اتمیزه نمودن ترکیبات در کوره گرافیتی دستگاه جذب اتمی

کوره گرافیتی با تولید حرارت ۳۵۰۰ درجه سانتی‌گراد، انرژی حرارتی لازم را برای شکستن پیوندهای شیمیایی فراهم می‌کند. از طرفی میزان حرارت تولید شده در دستگاه‌های اولیه دارای شعله هوا-استیلن معادل ۲۱۰۰-۲۴۰۰ درجه سانتی‌گراد و شعله اکسید نیتروژن- استیلن معادل ۲۶۰۰-۲۸۰۰ درجه سانتی‌گراد گزارش شده است. به‌طورکلی حساسیت بهتر دستگاه AAS دارای کوره گرافیتی برای آنالیز عناصر به دلیل حرارت بیشتر در کوره و همچنین مدت زمان بالاتر ماندگاری نمونه در کوره گزارش شده است که باعث می‌شود حساسیت آنالیز عناصر فلزی و شبه فلزی در مواردی حدود ۱۰۰۰ مرتبه بیشتر از سیستم‌های اولیه دارای مشعل باشد. با توجّه به

هزینه بالاتر آنالیز در دستگاه‌های جذب اتمی دارای کوره گرافیتی، عناصر آهن، روی، منیزیوم، کلسیم، پتاسیم و سدیم که به مقادیر زیادی در منابع آب، هوا، خاک و غذا وجود دارد و همچنین سمیت آنها ناچیز می‌باشد، از دستگاه جذب اتمی دارای مشعل استفاده می‌شود. برای آنالیت‌های دیگر که در تراکم‌های کمتری ایجاد مسمومیت می‌نمایند مانند منگنز، مس، کادمیوم، سرب، آرسنیک، نیکل و کروم، از دستگاه‌های جذب اتمی دارای کوره گرافیتی استفاده می‌شود.

طیف‌سنجی جذب اتمی با ژنراتور بخار هیدرید

شبه فلزاتی مانند آنتیموان (Sb)، آرسنیک (As)، سلنیوم (S) و تلوریم (Te) به‌طورمعمول در سال‌های اخیر با دستگاه جذب اتمی مجهز به ژنراتور بخار هیدرید[1] آنالیز می‌شوند. ضمناً به‌طور سنتی این سیستم برای آنالیز عناصر جیوه، بیسموت، ژرمانیوم، سرب و قلع نیز استفاده می‌شود. کاربرد این ژنراتور هیدرید برای آنالیز عناصر فلزی و شبه فلزی بر اساس خاصیت فراریت هیدریدها می‌باشد که برای افزایش حساسیت و کاهش مداخله‌گرها در سیستم‌های جذب اتمی به‌عوض سیستم نبولایزر استفاده می‌شود (شکل ۲۷-۶)



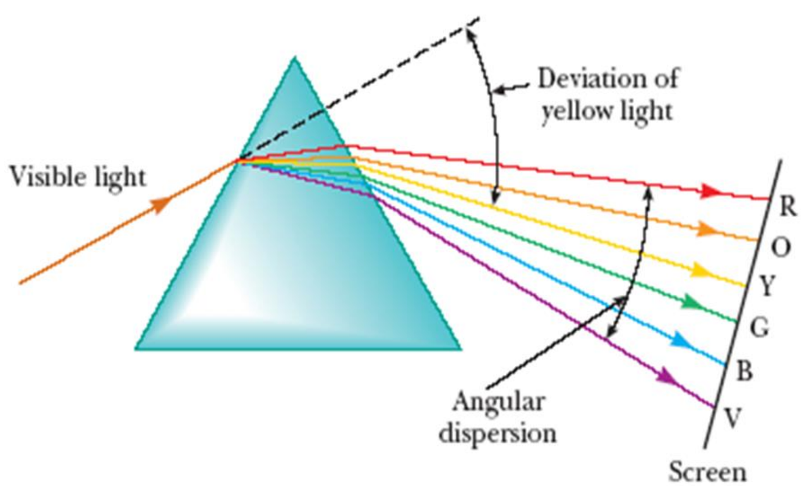
شکل ۲۷-۶) ساختار ژنراتور هیدرید نصب شده بر روی مشعل سیستم جذب اتمی

[1] Hydride Generator Atomic Absorption Spectrophotometry

در ژنراتور هیدرید، ترکیب ابتدا با استفاده از سدیم بورو هیدرید به حالت فرار هیدرید عنصر ترکیب درمی‌آید. در مرتبه بعدی بخارات هیدرید با استفاده از گاز حامل به سیستم اتم‌ساز جهت آنالیز یا دستگاه طیف‌سنج جذب اتمی رسانده می‌شود. سیستم اتم‌ساز همان‌طور که در شکل ۲۷-۶ دیده می‌شود دارای یک سیلندر شیشه‌ای به شکل T از جنس کوارتز است. سیستم اتم‌ساز بر روی سیستم مشعل دستگاه جذب اتمی قرار داده می‌شود و با دمای مداوم شعله، هیدریدها اتمیزه و با جذب انرژی تشعشعی از لامپ‌های هالوکاتد، آنالیز می‌شوند.

۶-۱-۲-۶-۳) دستگاه تک‌فام‌ساز انرژی تشعشعی

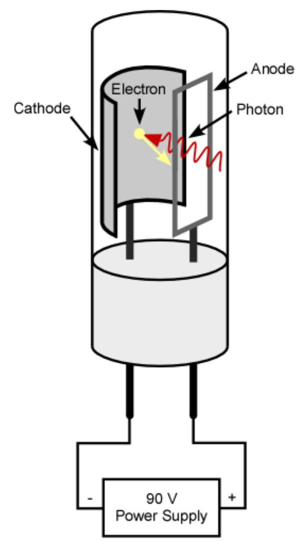
سیستم تک‌فام‌ساز به‌طورکلی پرتو چندفام را به پرتو تک‌فام تبدیل می‌کند. تک‌فام سازی پرتو انرژی (برای گزینش طول موج قابل جذب توسط عنصر مورد آنالیز) با استفاده از منشور و توری یا گریتینگ انجام می‌گردد (شکل ۲۸-۶). تک‌فام‌ساز از یک سیستم اپتیکی شامل عدسی و منشورهای شیشه‌ای، آیینه‌ها، شیاره‌های ورود نور مرکب و خروج پرتو تک‌فام تشکیل شده است. تک‌فام ساز یک بخش بسیار مهم از دستگاه طیف‌سنج اتمی است که جذب انرژی را برای یک طول موج اختصاصی عنصر فراهم می‌نماید.



شکل ۲۸-۶) ساختار سیستم تک‌فام ساز

۶-۱-۲-۶-۴) دستگاه آشکارساز

طبق شکل ۲۹-۶، دستگاه آشکارساز ترکیبی از فتوسل و تقویت‌کننده[1] است با برخورد فوتون به سطح فتوسل باعث برقرار شدن جریان الکتریسیته از کاتد به آند می‌شود. جریان الکتریسیته در سیستم تقویت در سیستم کامپیوتر ثبت می‌گردد.

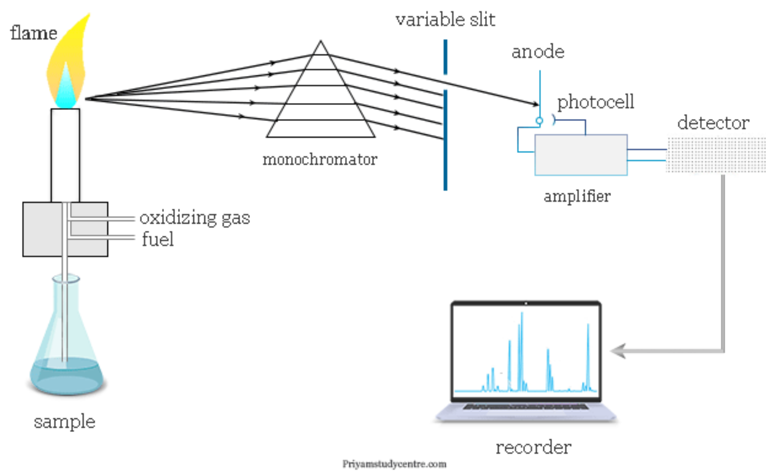


شکل ۲۹-۶) سیستم فتوسل

[1] photomultiplier

۶–۱–۳) آنالیز دستگاهی نشر اتمی

در روش اولیه آنالیز دستگاهی نشر اتمی (AES)[1]، عناصر فلزی و شبه فلزی با جذب انرژی شعله، برانگیخته می‌شوند و الکترون اتم‌ها با جذب انرژی حرارتی سیستم، به‌صورت انتقال الکترونیکی به اوربیتال‌های بالاتر می‌روند و در زمان بازگشت به حالت پایه، انرژی تشعشعی در طول موج خاصی که منحصر به عنصر اتمی است را منتشر می‌نمایند. سیستم حرارتی AES علاوه بر برانگیختگی عناصر، انرژی کافی برای تبخیر نمونه و اتمیزه شدن ترکیبات را نیز فراهم می‌نماید. انرژی تشعشعی منتشر شده در فرایند آنالیز در طول‌موج‌های مشخصی به سیستم آشکارساز دستگاه می‌رسد که مشخصه عنصر مورد آنالیز است (شکل ۳۰–۶).



شکل ۳۰–۶) سیستم نشر اتمی مجهز به دریچه قابل تنظیم برای ورود انرژی از تک‌فام ساز به فتوسل

سیستم اولیه دستگاه طیف‌سنجی نشر اتمی مشترکات زیادی با روش طیف‌سنجی جذب اتمی دارد با این تفاوت که دستگاه طیف‌سنج نشر اتمی، فاقد لامپ برای تولید انرژی تشعشعی است و ازاین‌رو، سیستم ساده‌تر است که منجر به کاهش هزینه برای انجام عملیات آنالیز آنالیت‌ها می‌شود (شکل ۳۱–۶)

اجزای سیستم AES مشابه با سیستم AAS به شرح زیر می‌باشند:

الف – دستگاه اتمیزه‌کننده

[1] Atomic Emission Spectroscopy

ب- مشعل دارای سوخت استیلن و هوا یا نیتروز اکسید

ج- سیستم نوری و تک‌فازساز

د- آشکارساز فتوسل حساس به نور

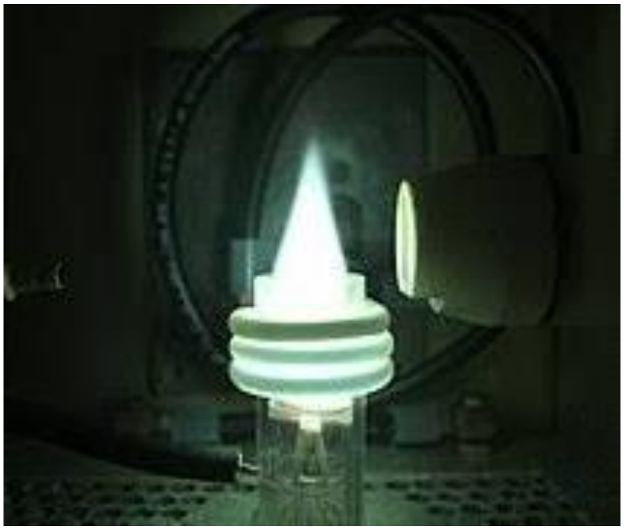
۶-۱-۳-۱) سیستم پیشرفته نشر اتمی پلاسمای جفت شده القائی

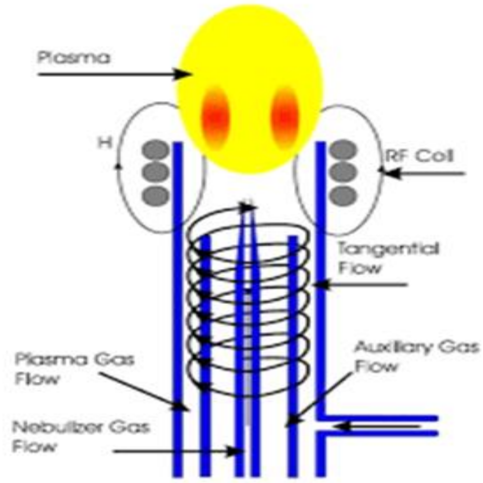
سیستم آنالیز دستگاهی طیف‌سنج نشر اتمی در چند دهه اخیر سیر تکاملی خود را داشته است و این سیستم در دهه اخیر به‌صورت طیف‌سنج نشر اتمی پلاسمای جفت شده القایی (ICP-OES)[۱] ارتقا یافته است. سیستم آنالیز دستگاهی ICP-OES همان‌طور که از اسمش مشخص می‌شود یک روش نشر اتمی است ولی به‌عوض شعله در بخش دستگاه اتمیزه‌کننده، دارای کوره پلاسما است که با راندمان بیشتری ترکیبات را اتمیزه می‌نماید و ازاین‌رو دارای توان تشخیصی بسیار بیشتری نسبت به دستگاه‌های نشر اتمی معمولی است. علی‌رغم شباهت ICP-OES به سیستم AES، بخش‌هایی از سیستم ICP-OES نیاز به توضیحات بیشتری به شرح زیر دارد:

۶-۱-۳-۱-۱) سیستم مولد انرژی الکتریسیته برای تولید پلاسما

سیستم الکترونیک دستگاه، انرژی لازم را از عبور از مدار مارپیچی در اطراف لوله شیشه‌ای فراهم می‌سازد. سیستم الکترونیک کنترل کننده توان انرژی برای تولید پلاسما در سطوح مختلف است. در صورت وجود تراکم کم نمونه تزریق شده به سیستم، توان سیستم می‌بایست برای آشکارسازی مناسب افزایش داده شود.

[1] Induced Coupled Plasma- Optical Emission Spectroscopy





شکل ۳۱-۶) کوره پلاسمای دستگاه ICP-OES

۶-۱-۳-۱-۲) ساختار کوره طیف‌سنج نشر اتمی پلاسمای جفت شده القایی

کوره پلاسما سیستم ICP-OES از سه لوله شیشه‌ای متحدالمرکز تشکیل شده است. گاز آرگون بین دو لوله بیرونی سیستم جریان دارد. جریان الکتریکی از سیم‌پیچ فلزی اطراف مشعل شیشه‌ای عبور می‌کند. جریان الکتریسیته یک میدان مغناطیسی قوی ایجاد می‌کند و برخورد اتم‌های گاز آرگون در میدان مغناطیسی باعث یونیزه شدن اتم‌های گازی می‌شود. با تخلیه شدن بار مثبت یون‌ها، جرقه و پلاسما ایجاد می‌شود. جریان الکتریسیته در سیم‌پیچ فلزی اطراف لوله شیشه‌ای حاوی گاز آرگون، شرایط پلاسما را حفظ می‌کند.

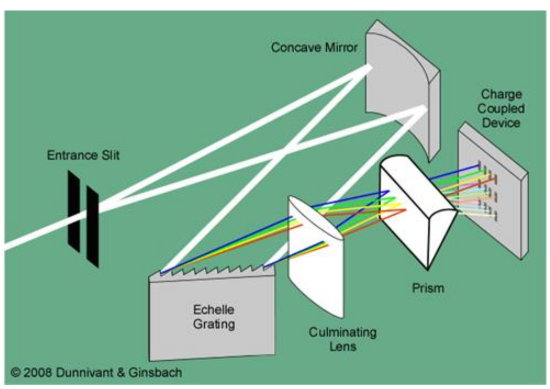
جریان مستقل دیگری از گاز آرگون، آنالیت تزریق شده به سیستم را به درون مشعل پلاسما می‌برد. گرمای پلاسما، حلال موجود در نمونه را تبخیر می‌کند. گرمای تولید شده همچنین مولکول‌های نمونه را اتمیزه می‌نماید و انرژی لازم برای برانگیختگی الکترون‌های اتم‌ها را فراهم می‌کند که باعث انتقال الکترون به مدارهای فوقانی با سطوح انرژی بالاتر می‌شود. در مرتبه بعدی الکترون‌های برانگیخته شده به مدار پایه خود مراجعت می‌نمایند و انرژی تشعشعی با طول موج مخصوص عنصر منتشر می‌شود که توسط آشکارساز سیستم دریافت و ثبت می‌گردد.

۶-۱-۳-۱-۳)   سیستم اپتیک دستگاه طیف‌سنج نشر اتمی پلاسمای جفت شده القایی

سیستم اپتیک دستگاه ICP شامل آیینه‌ها، لنزها و منشور است که نور ساطع شده از اتم‌ها و یون‌های پلاسما را به طیف‌سنج دستگاه هدایت می‌کند. در داخل طیف‌سنج، طیف‌های نوری از یکدیگر جدا می‌شوند و شدت نور در طول‌موج‌های مختلف در سیستم آشکارساز به‌طور دقیق اندازه‌گیری می‌شود (شکل ۳۲-۶).

۶-۱-۳-۱-۴)   سیستم آشکارساز طیف‌سنج نشر اتمی پلاسمای جفت شده القایی

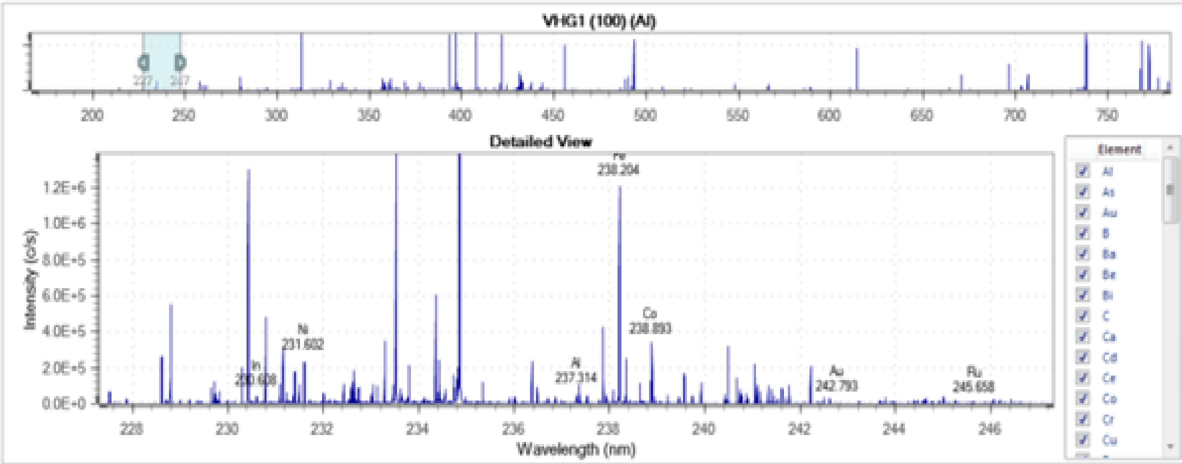
آشکارسازهای مورد استفاده در ابزار ICP-OES در سال‌های اخیر به‌طور قابل‌توجّهی تغییر کرده‌اند. آنها در حال حاضر به شکل دستگاه‌هایی به نام دستگاه‌های تراشه‌ای جفت شده[1] هستند. این سیستم به‌صورت تراشه‌های شبیه کامپیوتر هستند که سطح آن به بخش‌هایی به نام پیکسل تقسیم‌شده‌اند که هرکدام از آنها فوتون‌های نور را با طول موج متفاوت اندازه‌گیری می‌کنند (شکل ۳۲-۶).



شکل ۳۲-۶) سیستم اپتیک و آشکارساز پیشرفته در دستگاه‌های تراشه‌ای ICP-OES

در یک سیستم آنالیز دستگاهی ICP-OES، معمولاً شدت پرتو تابشی در دامنه طول‌موج‌های ۱۶۷ تا ۷۸۵ نانومتر را به‌طور هم‌زمان اندازه‌گیری می‌شوند (شکل ۳۳-۶).

[1] Charged Coupled Devices



شکل ۳۳-۶) نمایش طیف‌های انرژی منتشر شده برای عناصر مختلف در سیستم دستگاهی ICP-OES

در شکل فوق پرتوی تابشی از نمونه حاوی ترکیبات ایندیم (In)، نیکل (Ni)، آلومینیوم (Al)، آهن (Fe)، کبالت (Co)، طلا (Au) و روتنیم (Ru) را در طول‌موج‌های مختلف نشان می‌دهد. این پیک‌های تیز در طول‌موج‌های مختلف، خطوط تحلیلی گاهی اوقات خطوط انتشار انرژی نامیده می‌شوند. هر عنصر ممکن است خطوط تحلیلی زیادی داشته باشد که هرکدام از آنها در طول موج متفاوتی هستند. خطوط تحلیلی مرتبط با سطوح انرژی است که الکترون‌ها بین آنها حرکت می‌کنند (شکل ۳۳-۶).

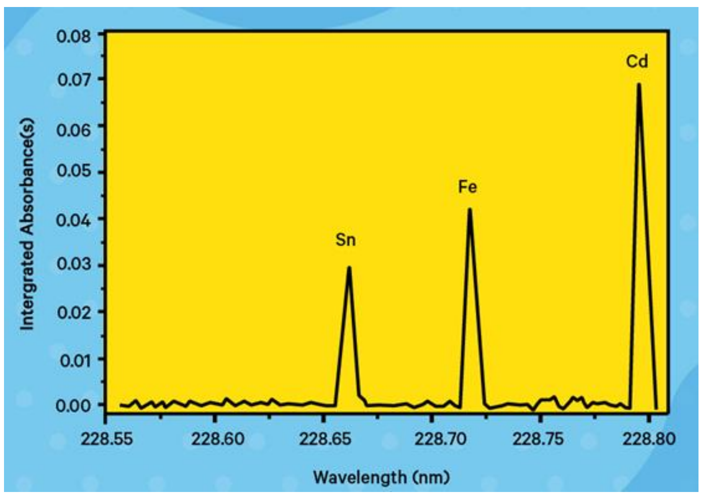
۶-۱-۳-۲) حد آشکارسازی سیستم طیف‌سنج نشر اتمی پلاسمای جفت شده القایی

قابلیت ICP-OES در مقایسه با روش‌های آنالیز دستگاهی طیف‌سنج جذب اتمی شعله‌ای و کوره گرافیتی بهتر است. به‌طورکلی بیشترین حد تشخیص در سیستم دستگاهی ICP-OES برای عناصر فلزی و شبه فلزی در حدود ۱۰ ppb یا کمتر است. سیستم ICP فوق مدرن در دهه اخیر با آشکارساز جرمی Mass Detector نیز ارائه شده است. لازم به‌ذکر است که تفاوت سیستم جدید ICP-MS با سیستم ICP-OES در قابلیت آشکارسازی دو تا پنج مرتبه بیشتر برای بسیاری از عناصر است.

۶-۱-۳-۳) خلاصه‌ای از مراتب کاری طیف‌سنجی جذب و نشر اتمی

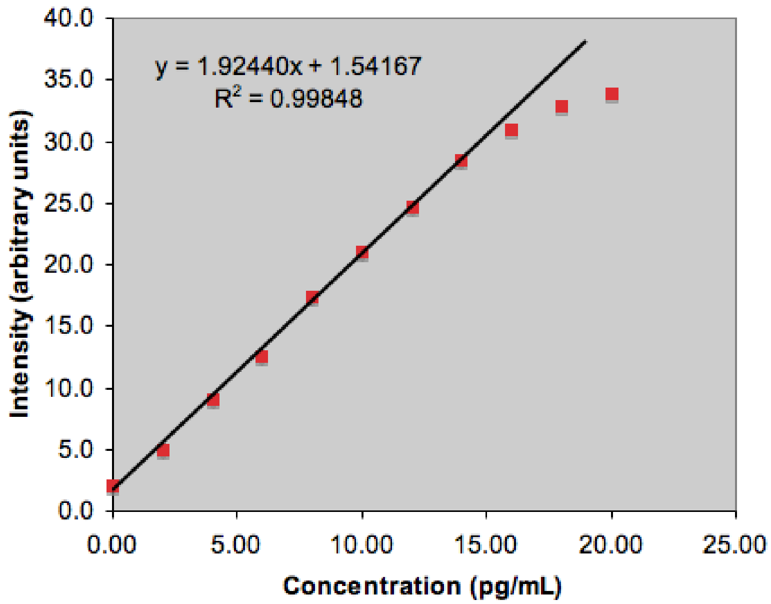
مراتب کاری سیستم دستگاهی ICP-OES شبیه به سیستم OES معمولی است ولی با توجّه به برخورداری از سیستم کوره پلاسما در ICP-OES، دارای توان آنالیز به‌مراتب بیشتری است. به‌طورکلی مکانیسم کاری این سیستم به شرح زیر است:

- **ترکیبات تزریق شده به سیستم پلاسما در دمای ۶۰۰۰ الی ۱۰۰۰۰ درجه کلوین، اتمیزه می‌شوند.**
- **در مرتبه بعدی عناصر فلزی و شبه فلزی با حرارت کوره پلاسما برانگیخته می‌شوند.**
- **عناصر برانگیخته شده به حالت پایدار خود بازمی‌گردند و پرتو تابشی منحصر به هر عنصر را منتشر می‌کنند.**



شکل ۳۴-۶) پیک‌های جذب عناصر مختلف در طیف‌سنجی جذب و نشر اتمی

- **پرتو تابشی عناصر توسط آشکارساز دریافت می‌شود که شدت نور ساطع شده از آنها متناسب با تراکم عنصر موردنظر است.**
- **غلظت عناصر موردنظر در یک محلول، بر اساس فرمول به‌دست‌آمده از نمودار کالیبراسیون محاسبه می‌گردد.**



شکل ۳۵-۶) خط رگراسیون نمونه‌های استاندارد طیف‌سنجی جذب و نشر اتمی

- **روش‌های طیف‌سنجی اتمی برای اندازه‌گیری فلزات و شبه فلزات در نمونه‌های هوا کاربرد فراوانی دارد.**
- **ارجحیت کلی روش‌های دستگاهی برای آنالیز ترکیبات فلزی و شبه فلزی به شرح جدول ۴-۶ مطرح می‌باشد.**

جدول ۴-۶) ارجحیت کلی روش‌های طیف‌سنجی برای عناصر مختلف

نشر اتمی دارای قابلیت آنالیز کمتر از جذب اتمی	نشر اتمی دارای قابلیت آنالیز مشابه با جذب اتمی	نشر اتمی دارای قابلیت آنالیز بهتر از جذب اتمی
Ag, As, Au, B, Be, Bi, Cd, Co, Fe, Hg, Ir, Mg, Ni, Pb, Pt, Sb, Se, Si, Sn, Te, Zn	Cr, Cu, Dy, Er, Gd, Ge, Mn, Mo, Nb, Pd, Rh, Sc, Ta, Ti, V, Y, Zr	Al, Ba, Ca, Eu, Ga, Ho, In, K, La, Li, Lu, Na, Nd, Pr,Rb, Re, Ru, Sm, Sr, Tb, Tl, Tm, W, Yb

۶-۱-۳-۴) مراحل آنالیز ترکیبات فلزات و شبه فلزات نمونه‌های هوا با طیف‌سنج اتمی

- **نمونه‌برداری از هوای محیط بر اساس روش‌های استاندارد.**
- **آماده‌سازی نمونه‌های استاندارد (می‌بایست در محاسبات حد آستانه تماس شغلی (TLV) مورد پوشش قرار گیرد و در دامنه رابطه خطی غلظت با سیگنال دستگاه باشد (Linear Range Concentration)).**
- **تهیّه محلول شاهد (محلولی که دارای تمامی اجزای تشکیل دهنده نمونه‌های استاندارد به‌غیراز نمونه موردنظر باشد و تنظیم جذب دستگاه طیف‌سنج جذب اتمی بر روی صفر بر اساس آن).**
- **تهیّه نمونه‌های استاندارد (ترجیحاً ۶ الی ۸ استاندارد کاری) از ترکیبات عناصر موردنظر با غلظت‌های مشخص طبق روش استاندارد.**
- **قرائت جذب یا نشر اتمی نمونه‌های استاندارد**
- **محاسبه فرمول خط رگرسیون محلول استاندارد برحسب غلظت و سیگنال جذب یا نشر انرژی**
- **اندازه‌گیری جذب محلول مجهول و به‌دست آوردن غلظت با استفاده از فرمول نمودار کالیبراسیون**

۶-۱-۳-۵) کاربرد روش‌های جذب و نشر اتمی در رشته مهندسی بهداشت حرفه‌ای برای آنالیز ترکیبات شیمیایی در هوای محیط کار

روش‌های طیف‌سنجی اتمی به‌صورت جذب اتمی، نشر اتمی و نشر اتمی پیشرفته (ICP-OES) به‌صورت گسترده‌ای در روش‌های مصوب سازمان‌های OSHA، ASTM و به‌خصوص NIOSH به‌کاربرده شده است. به‌طورکلی همان‌طور که قبل‌تر گفته شد، روش‌های طیف‌سنجی جذب و نشر اتمی ویژه آنالیز عناصر فلزی و شبه فلزی است که در آن ترکیبات به‌صورت اتمی اندازه‌گیری می‌شوند. کاربرد طیف‌سنج اتمی برای آنالیز در رشته مهندسی بهداشت حرفه‌ای و با هدف پایش کارکنان در فرایندهای صنعتی، داده‌هایی به‌صورت عنصری را ارائه می‌دهد که استفاده از آن برای ارزشیابی مواجهه شغلی کارکنان و مقایسه با TLV نیازمند دانش در خصوص فرایندهای صنعتی و ترکیبات به‌کاربرده شده یا تولید شده است. برای مثال مواجهه اصلی جوشکاران فلز آهن با دمه اکسید آهن (Fe_2O_3) اتفاق می‌افتد که با توجّه به TLV ترکیب یاد شده و داده‌های به‌دست آمده از آنالیز دستگاهی طیف‌سنج اتمی به‌صورت جذب و یا نشر اتمی، می‌بایست محاسبه و ارزشیابی گردد. لازم به‌ذکر است

که در نبود اطلاعات برای ماهیت ترکیب در مواجهه فردی می‌بایست از روش تکمیلی برای تشخیص ترکیبات در فرایندهای مختلف صنعتی به‌صورت پراش اشعه X یا روش‌های یون کروماتوگرافی و یا روش پلاسمای جفت شده همراه با آشکارساز جرمی (ICP-MS) استفاده شود.

در چهار دهه اخیر پروژه‌های متعدد پژوهشی در زمینه اندازه‌گیری دمه فلزات از جمله آلومینیوم با استفاده از روش شماره ۷۰۱۳ سازمان NIOSH انجام شده است. در پروژه‌های دیگر، اندازه‌گیری دمه اکسید آهن در جوشکاری‌ها یا مواجهه شغلی کارکنان با گرد و غبار اکسیدهای آهن در معدن سنگ‌آهن با استفاده از روش ۱۲۱ سازمان OSHA انجام شد. در چند پروژه روش نشر اتمی به‌صورت OES–ICP و یا ICP-MS برای ردیابی مقادیر بسیار کم نانولوله‌های کربنی چند جداره فلزی (MWCNTs)[1] استفاده شد. در پروژه‌های دیگری نیز ناخالصی‌های نانو ذرات اکسیدهای آهن مگنتیت[2] و هماتیت[3] با روش پیشرفته ICP-OES مورد بررسی قرار گرفتند.

با توجّه به قابلیت روش OSHA ۱۲۱ و در دسترس بودن سیستم آنالیز دستگاهی به‌صورت طیف‌سنج جذب و نشر اتمی برای آنالیز در کشورمان، پژوهشگران اکثراً از این روش برای آنالیز ترکیبات فلزات و شبه فلزات استفاده می‌کنند. ازاین‌رو مثال زیر متمرکز بر شرح اجمالی روش OSHA ۱۲۱ در این بخش آورده شده است.

---

[1] Multi-walled carbon nanotubes

[2] Magnetite

[3] Hematite

مثال نخست: شرح مختصر روش ۱۲۱ سازمان OSHA برای آنالیز فلزات

روش ۱۲۱ سازمان OSHA از طیف‌سنجی جذب اتمی برای ۳۲ ترکیب فلزات و شبه فلزات به شرح زیر استفاده می‌کند.

جدول ۵-۶) ترکیبات عناصر مختلف برای آنالیز به روش طیف‌سنجی جذب و نشر اتمی

Aluminum (Al)	Cobalt (Co)	Lithium (Li)	Silver (Ag)
Gold (Au)	Molybdenum (Mo)	Thallium (Tl)	Bismuth (Bi)
Potassium (K)	Yttrium (Y)	Cesium (Cs)	Iron (Fe)
Antimony (Sb)	Copper (Cu)	Magnesium (Mg)	Sodium (Na)
Hafnium (Hf)	Nickel (Ni)	Tin (Sn)	Cadmium (Cd)
Selenium (Se)	Zinc (Zn)	Chromium (Cr)	Lead (Pb)
Barium (Ba)	Platinum (Pt)	Manganese (Mn)	Tellurium (Te)
Indium (In)	Zirconium (Zr)	Titanium (Ti)	Calcium (Ca)

الف) روش نمونه‌برداری

لازم به‌ذکر است روش‌های تخصصی نیز برای برخی از عناصر جدول فوق ارائه شده است که به‌طور تخصصی ترکیبات را با حساسیت بیشتر به روش طیف‌نگاری جذب یا نشر اتمی آنالیز می‌نماید. در روش ۱۲۱، نمونه‌برداری از طریق کاست فیلتر و یا ترجیحاً هد نمونه‌بردار IOM مجهز به فیلتر استرسلولزی (MCE) یا پلی‌وینیل‌کلراید (PVC) با گذر حجمی ۲ لیتر در دقیقه و حجم ۴۸۰ الی ۹۶۰ لیتر انجام می‌شود.

ب) روش استخراج ترکیبات نمونه‌برداری شده

پس از پایان نمونه‌برداری، فیلتر از هد نمونه‌بردار با انبرک برداشته و در بشر شیشه‌ای قرار داده می‌شود و بر اساس محلولیت ترکیب در آب با روش‌های مختلف استخراج می‌گردد (جدول ۶-۶). نحوه استخراج برای ترکیبات مختلف با هشت روش جایگزین به شرح زیر اعلام شده‌اند.

جدول ۶-۶) شرح استخراج ترکیبات شیمیایی نمونه‌برداری شده توسط فیلتر با هشت روش مختلف

شماره روش استخراج عناصر مختلف	شرح روش استخراج
AP1: Ag, Pb, Sb, Se, Te	**۱- نمونه‌ها را با HNO_3 هضم کنید و حرارت دهید تا اسید تقریباً تمام شود. اجازه دهید نمونه‌ها در دمای اتاق خنک شوند.** **۲- برای حجم نهایی نمونه در ظرف پلی‌اتیلن ۲۵ میلی‌لیتری، مقادیر مختلفی از HCl غلیظ را با حجمی متناسب با عناصر مختلف زیر اضافه کنید:** **Sb ۸ میلی‌لیتر** **Pb یا Ag ۴ میلی‌لیتر** **Se یا Te ۱ میلی‌لیتر** **۳- به آرامی نمونه داخل بشر را گرم کنید و تکان دهید تا آنالیت حل شود. اجازه دهید نمونه‌ها خنک شوند و سپس آن را با آب دیونیزه به حجم ۲۵ میلی‌لیتر برسانید.** **۴- نمونه‌ها را با دستگاه طیف جذب یا نشر اتمی آنالیز نمایید.**
AP2: ترکیبات محلول عناصر Al, Ba, Cr (II or III), Fe, Ni, Mo, Tl, Zn	**۱- نمونه را در یک بشر قرار داده و مقدار کمی از آب دیونیزه در دمای اتاق را به بشر اضافه کنید (معمولاً ۱۵ میلی‌لیتر)** **۲- بشر را به مدت تقریبی ۱۰ دقیقه در حمام اولتراسونیک قرار دهید.** **۳- نمونه را در سانتریفیوژ و در دور RPM ۵۰۰۰ از ذرات معلق صاف نمایید. سپس نمونه را در یک بالن ژوژه به حجم ۲۵ میلی‌لیتری منتقل کنید.** **۴- نمونه‌ها را با محلول اسید نیتریک ۴٪ به حجم رسانده و برای افزایش حساسیت بیشتر محلول µg/mL ۱۰۰۰ از پتاسیم به آن اضافه کنید.** **۵- نمونه‌ها را با دستگاه طیف جذب یا نشر اتمی آنالیز نمایید.**
AP 3: Ca, (پودر آتش‌زا) Al Mg, Mo نامحلول در آب	**۱- بشر حاوی فیلتر را در زیر یک هود قرار دهید و ۳ تا ۵ میلی‌لیتر از HNO_3 غلیظ به آن اضافه کنید و بشر را حرارت دهید تا حدود ۱ میلی‌لیتر اسید در آن باقی بماند. در مرتبه دوم مجدداً تا ۲ میلی‌لیتر HNO_3 غلیظ را اضافه کنید. بشر را تا موقعی که کاملاً از اسید خشک نشده است، حرارت دهید (۱ میلی‌لیتر HNO_3 غلیظ در حجم ۲۵ میلی‌لیتر از آب دیونیزه، غلظت اسید را به حدود ۴٪ می‌رساند).** **۳- نمونه را به در بالن ژوژه ۲۵ میلی‌لیتر به حجم برسانید.** **۴- برای سرکوب یونیزاسیون عناصر از یون پتاسیم µg/mL ۱۰۰۰ در محلول ۴٪ از آب و اسید استفاده نمایید.** **۵-نمونه‌ها را با دستگاه طیف جذب یا نشر اتمی آنالیز نمایید.**
AP 4: (فلزی) Au, Pt, Sn, or Tin Oxide (SnO)	**۱-برای عناصر Au, Sn و یا ترکیب SnO، ۹ میلی‌لیتر اسید HCl به هر بشر اضافه نمایید و آن را تکان داده و ۲ میلی‌لیتر اسید HNO_3 را به آن اضافه کنید. لازم به تذکر است در مرتبه اول برای اضافه کرد اسید HCl، تمام فیلتر می‌بایست مرطوب شود و حداقل ۲ الی ۳ دقیقه وقت بدهید و سپس اسید HNO_3 به آن اضافه شود.** **۲- بشر را روی دستگاه حرارتی HOT PLATE قرار داده و حرارت داده تا تقریباً کل اسید تبخیر شود.** **۳- اجازه دهید نمونه در داخل بشر خنک شود و سپس نمونه را چند بار با استفاده از مقداری از آب دیونیزه مخلوط نموده و به بالن ژوژه ۲۵ میلی‌لیتری انتقال داده و به حجم برسانید. در این شرایط محلول نهایی معادل HCL ۱۰٪ می‌شود. به‌عنوان‌مثال، اگر حجم کل محلول ۲۵ میلی‌لیتر باشد، ۲.۵ میلی‌لیتر HCl غلیظ به نمونه اضافه کنید.** **۴- نتایج برای Sn یا SnO به‌صورت Sn آنالیز می‌شود.** **۵- نمونه‌ها را با دستگاه طیف جذب یا نشر اتمی آنالیز نمایید.**

AP 5: نمونه‌های Cr دارنده Cr(VI)]	برای نمونه‌هایی که داده‌ها را به‌صورت Cr کل نیاز دارند روش به شرح زیر ارائه می‌شود ولی برای آنالیز ترکیب شش ظرفیتی کروم می‌بایست ترجیحاً از روش OSHA ID-215 به‌صورت یون‌کروماتوگرافی و یا روش NIOSH ۷۶۰۰ به‌صورت طیف‌سنجی نوری استفاده شود. ۱- نمونه‌های برداشته شده بر روی فیلترهای MCE را با HNO_3 هضم کنید و سپس اجازه دهید تا در دمای اتاق خنک شود. اگر از فیلترهای PVC استفاده شد، نخست با HNO_3 هضم کنید و سپس ۲ میلی‌لیتر $HClO_4$ به آن اضافه نموده و بگذارید نمونه سرد شود. ۲- ۱ تا ۲ میلی‌لیتر H_2O_2 ۳۰٪ را به محلول خنک شده اضافه کنید تا Cr(VI) موجود در آن احیا شود. اجازه دهید نمونه برای چند دقیقه استراحت داده شود. ۳- تقریباً ۵ دقیقه حرارت دهید تا H_2O_2 بجوشد و تبخیر شود. سپس اجازه دهید خنک شود. در این مرحله HCl را در صورت لزوم برای حل کردن سایر فلزات اضافه نمایید. ۴- نمونه را با آب دیونیزه به حجم برسانید و سپس نمونه را آنالیز کنید. توجّه: اگر مقدار زیادی HCl از قبل وجود دارد، $HClO_4$ را به محلول نمونه اضافه نکنید زیرا ترکیبات کروم شش ظرفیتی ممکن است از بین برود. ازاین‌رو اسید نیتریک را اضافه نموده و بگذارید با اسید HCL بجوشد و بعد از تبخیر تقریبی اسیدها، اسید $HClO_4$ را اضافه کنید. ۵- نمونه‌ها را با دستگاه طیف جذب یا نشر اتمی آنالیز نمایید.
AP 6: عناصر یا ترکیبات نامحلول در اسید نیتریک برای هضم اسیدی	۱- برای ترکیباتی مانند دی‌اکسید زیرکونیوم یا دی‌اکسید هافنیم، فیلتر نمونه را در یک بوته فلزی از جنس پلاتین قرار دهید. محتوی بوته را در دمای ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد بسوزانید، سپس بقای مواد را در دمای ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد بسوزانید. ۲- ۱ تا ۲ میلی‌لیتر HF اضافه کنید، محلول را تکان دهید و سپس روی دستگاه حرارتی **HOT** PLATE حرارت دهید تا بقای مواد در ته بوته حل شود. ۳- محلول را تا حدود ۰.۴ میلی‌لیتر تبخیر کنید و سپس نمونه را به یک ظرف پلی‌اتیلن با حجم ۱۰ میلی‌لیتری منتقل کنید و بونه فلزی را با محلول ۰.۱ مولار از فلوراید آمونیوم در آب‌اسید HNO_3 ۴٪ شسته و به ظرف پلی‌اتیلن انتقال داده و نمونه را حجم ۱۰ میلی‌لیتر برسانید. ۴- نمونه‌ها را با دستگاه طیف جذب یا نشر اتمی آنالیز نمایید.
AP 7: CsOH, KOH, LiH, و ترکیبات Na	۱- فیلتر نمونه را در یک بشر قرار داده و با ۱۵ میلی‌لیتر آب دیونیزه به مدت تقریبی ۵ دقیقه استخراج نمایید. ۲- محلول نمونه را به یک فلاسک ۲۵ میلی‌لیتری انتقال دهید و نمونه‌های زیر را با آب دیونیزه و محلول پتاسیم یا سدیم به حجم برسانید. امکان وجود ترکیبات زیر در نمونه — محلول مناسب برای به حجم رساندن نهایی CsOH — DI H2O/1000 µg/mL potassium ion LiH, Na cmpds — DI H2O KOH — DI H2O/1000 µg/mL sodium ion ۳- نمونه‌ها را با دستگاه طیف جذب یا نشر اتمی آنالیز نمایید.
AP 8: Titanium Dioxide	۱- فیلتر را با ۱ میلی‌لیتر HNO_3 و ۲ میلی‌لیتر H_2SO_4 در یک ظرف پلی‌اتیلن مخروطی به آرامی حرارت داده و هضم نمایید تا حدود ۱ میلی‌لیتر باقی بماند. ۲- محلول را به یک فلاسک پلی‌اتیلنی با حجم ۲۵ میلی‌لیتر منتقل کنید، ۵ میلی‌لیتر یون پتاسیم با غلظت ۵۰۰۰ میکروگرم بر میلی‌لیتر به آن اضافه کنید. سپس با آب دیونیزه به حجم ۲۵ میلی‌لیتر برسانید. ۳- نمونه‌ها را با دستگاه طیف جذب یا نشر اتمی آنالیز نمایید.

ج) ساخت استانداردهایی از ترکیبات مختلف جهت آنالیز نمونه‌ها به روش طیف‌سنجی جذب و نشر اتمی

محلول‌های استاندارد روش‌های طیف‌سنجی جذب یا نشر اتمی بر اساس جدول ۷-۶ و با در نظر گرفتن حد غلظت‌های آشکارسازی کمّی برحسب µg/mL و بیشینه دامنه خطی می‌بایست تهیّه گردد. این دامنه غلظتی می‌بایست به ترتیبی باشد که از تقسیم جرم محاسبه شده از نمونه‌های استاندارد بر حجم هوای نمونه‌برداری مقادیر TLV-TWA ترکیب موردنظر را تحت پوشش قرار دهد. برای تهیّه محلول استانداردهای ترکیبات مختلف با توجّه به میزان حلالیت ترکیبات و شرایط نگهداری آنها، می‌بایست مندرجات جدول ۸-۶ از روش ۱۲۱ سازمان OSHA رعایت گردد.

جدول ۷-۶) حد آشکارسازی، حساسیت و دامنه غلظتی متناسب با سیگنال دستگاه

عناصر	حد آشکارسازی کیفی Qualitative *DL (µg/mL)	حد آشکارسازی کمّی Analytical *DL (µg/mL)	حساسیت Sensitivity (µg/mL)	بیشینه دامنه خطی استاندارد Upper Linear Range (µg/mL)
Ag	0.025		0.5	0.2
Al^{+}	<0.0005	0.03^{+}	0.08 (0.029)$^{+}$	7
Au	0.0002	0.004	0.025	2
Ba^{+}	0.01	0.04	0.15	5
Cr	0.003	0.04 (0.04)$^{+}$	0.1 (0.31)$^{+}$	5 (10)$^{+}$
Cs	0.005^{++}	0.005	0.2	15
Cu	0.001	0.03	0.09	5
Fe	0.005	0.1	0.12	5
Hf^{+}	2.0	0.02	15	500
In	0.02	0.1	0.7	50
K	<0.002	0.02	0.04	2
Li	0.0003	0.004	0.035	2
Mg	<0.0001	0.01	0.007	0.5
Mn	0.002	0.01	0.055	3
Mo^{+}	0.02	0.04	0.5	60
Na	<0.0002	0.009	0.015	1
Ni	0.002	0.1	0.15	5
Pb	0.01	0.05	0.5	20
Pt	-	2.0	13	-
Sb**	(0.08)	0.1	1.0	50
Se***	(0.05	0.3	0.25	25
Sn***	(0.01)	0.1	0.6	40
Te	0.05	0.2	1.0	25
Ti	0.04	-	1.8	-
Tl	0.03	0.05	0.5	20

200	1.8	0.7	0.05	Y
1	0.018	0.01	<0.01	Zn
800	10.0	8	1.0	Zr^{+}

DL*= حد تشخیص. برای اطلاعات بیشتر در مورد تعاریف یا محاسبات به پیوست A از روش OSHA ID-121 مراجعه کنید. DL ها تحلیلی تقریبی هستند.

**** طول موج جایگزین ۲۳۱.۲ نانومتر با یک استثنا استفاده می‌شود: مقدار حد تشخیص کیفی برای طول موج (۲۱۷.۶ نانومتر) است.**

***** شعله هوا و هیدروژن در شرایط استثنایی برای تعیین حد تشخیص کیفی استفاده می‌شود ولی این مقدار برای شعله هوا و اسیتلن است.**

+ شعله N_2O/C_2H_2 استفاده شده است.

++ طیف‌سنجی انتشار اتمی با شعله برای تعیین حد تشخیص کیفی استفاده می‌شود.

تمرین: محدوده غلظت‌های استاندارد آنالیز ترکیب مولیبدیوم از جدول ۷-۶ محاسبه نمایید.

همان‌طور که قبل‌تر گفته شد حجم نمونه‌های استاندارد و نمونه مجهول در حد ۲۵ میلی‌لیتر است. از این‌رو میزان جرم نمونه در حد آشکارسازی کمّی به‌شرح زیر است:

۲۵ml × ۰.۰۴ µg/ml=۱ µg

با توجّه به حداقل حجم نمونه‌برداری در میزان ۴۸۰ لیتر، غلظت هوای محیط برابر است:

۱ µg / ۰.۴۸ m^3= ۲.۰۸۳ µg/m^3

میزان جرمی حد بیشینه دامنه خطی

۲۵ml × ۶۰ µg/ml=۱۵۰۰ µg

با توجّه به حجم نمونه‌برداری حداقل ۴۸۰ لیتر، غلظت هوای محیط برابر است با

۱۵۰۰ µg / ۰.۴۸ m^3=۳۱۲۵ µg/m^3

دامنه غلظتی برای اندازه‌گیری ترکیبات مولیبدیوم هوا در محدوده µg/m^3 ۲.۰۸۳ -۳۱۲۵ است که می‌بایست TLV ترکیب را تحت پوشش قرار دهد. بر اساس اطلاعات ارائه شده در جدول ۷-۶ و محاسبات کمینه و بیشینه ترکیبات مولیبدیوم (Mo) و دامنه µg/m^3 ۲.۰۸۳ -۳۱۲۵، ارزشیابی مواجهه شاغلین را در مقایسه با دو مورد از

TLV های ارائه شده، تحت پوشش قرار می‌دهد و در مورد سوم که TLV مربوط به فلز مولیبدیم است، می‌توان نمونه را یک مرتبه رقیق‌سازی نمود و ضریب رقّت[1] را در فرمول محاسبه تراکم ترکیبات در هوا، لحاظ نمود.

جدول ۸-۶) TLV ترکیبات مولیبدیوم از کتاب استاندارد تماس شغلی و شاخص‌های بیولوژیکی سازمان ACGIH انتشار سال 2023

نام ترکیب	TWA	STEL	تذکرات	اساس محاسبه TLV
ترکیبات مولیبدیوم محلول	۰.۵ mg/m^3 (R)	—	A3	تحریک مجاری تنفسی پایینی
فلز مولیبدیوم و ترکیبات نامحلول آن (به‌صورت استنشاقی)	۱۰ mg/m_3 (I)	—	—	
فلز مولیبدیوم و ترکیبات نامحلول آن (به‌صورت تنفسی)	۳ mg/m^3 (R)	—	—	

R= قابل استنشاق

I= قابل تنفس

د) تنظیمات دستگاه طیف‌سنجی جذب و نشر اتمی

قبل از تزریق نمونه‌ها، دستگاه‌های آنالیزور می‌بایست برای آنالیز ترکیب مورد نظر آماده‌سازی شوند و این تنظیمات عبارتند از ۱) تنظیم طول موج جذب یا نشر اتمی برای عنصر فلزی یا شبه فلزی هر ترکیب، ۲) تنظیم شیاره دستگاه تک‌فام ساز، به حداکثر رساندن حساسیت روش جذب یا نشر اتمی برای غلظت‌های استاندارد (برای مثال میزان جذب ۰.۳ غلظت استاندارد ۴ µg/mL عنصر نقره می‌بایست تجربه شود و از تنظیمات دیگر کاربرد نوع شعله و موارد خاص دیگر در مورد آنالیز نمونه‌ها نیز می‌بایست رعایت گردد) (جدول ۹-۶).

[1] Dilution Factor

جدول ۹-۶) متغیرهای آنالیز که برای تنظیم نمودن دستگاه در بهترین شرایط عملکردی

عناصر فلزی ترکیبات	طول موج (nm)	شیاره (nm)	معیار به حداکثر رساندن جذب برای غلظت استاندارد	نوع شعله‌ای برای بهترین جذب	ملاحظات ویژه
Ag	۳۲۸.۱	۰.۷	۴ µg/mL =۰.۳ ABS	۱	در مورد کاربرد لامپ‌های چند عنصری شامل Cu از شیاره تک‌فام ساز ۰.۲ نانومتر استفاده شود
Al	۳۰۹.۳	۰.۷	۵۰ µg/mL =۰.۲۲ ABS	۳	–
Au	۲۴۲.۸	۰.۷	۱۵ µg/mL =۰.۲۶ ABS	۱	–
Ba	۵۵۳.۶	۰.۴	۱۵ µg/mL =۰.۱۶ ABS	۳	–
Bi	۲۲۳.۱	۰.۲	۲۰ µg/mL =۰.۱۸ ABS	۱	–
Ca**	۴۴۲.۷	۰.۷	۴ µg/mL =۰.۲۲ ABS	۴	–
Cd**	۲۲۸.۸	۰.۷	۲ µg/mL =۰.۳۵ ABS	۱	–
Co	۲۴۰.۷	۰.۲	۵ µg/mL =۰.۰۱۵ ABS	۲	–
Cr**	۳۵۷.۹	۰.۷	۲ µg/mL =۰.۰۵ ABS	۳	–
Cs	۸۵۲.۱	۱.۴	۱۰ µg/mL =۰.۲۲ ABS	۱	–
Cu**	۳۲۴.۷	۰.۷	۵ µg/mL =۰.۲۵ ABS	۱	در مورد کاربرد لامپ‌های چند عنصری شامل Ni یا Fe از شیاره تک‌فام ساز ۰.۲ نانومتر استفاده شود
Fe**	۲۴۸.۳ ۲۴۸.۸	۰.۲ ۰.۲	۵ µg/mL =۰.۱۸ ABS ۵ µg/mL =۰.۱۱ ABS	۲ ۲	در حضور Co از لامپ چند عنصری شامل Co در طول موج ۲۴۸.۳ nm استفاده نکنید و به‌عوض آن از طول موج‌های ۲۴۸.۸ nm و ۷۲ استفاده نمایید
Hf	۶۲۸۶.۶	۰.۲	۳۰۰ µg/mL =۰.۲ ABS	۳	–

In	۳۰۳.۹	۰.۷	۲۵ µg/mL =۰.۱۵ ABS	۱	–
K	۷۶۶.۵	۱.۴	۲ µg/mL =۰.۳ ABS	۱	–
Li	۶۷۰.۸	۱.۴	۱ µg/mL =۰.۱۳ ABS	۱	–
Mg**	۲۸۵.۲	۰.۷	۰.۳ µg/mL =۰.۱۹ ABS	۳	–
Mn**	۲۷۹.۵	۰.۲	۲ µg/mL =۰.۱۶ ABS	۱	–
Mo**	۳۱۳.۵	۰.۷	۲ µg/mL =۰.۲ ABS	۳	–
Na	۵۸۹.۶	۰.۴	۰.۸ µg/mL =۰.۲ ABS	۱	–
Ni**	۲۳۲	۰.۲	۵ µg/mL =۰.۱۵ ABS	۱	برای لامپ‌های چند عنصری شامل Fe طول موج ثانویه ۳۵۲.۴ nm برای نیکل استفاده نمایید
Pb	۲۸۳.۳	۰.۷	۲۰ µg/mL =۰.۱۸ ABS	۱	–
Pt	۲۶۵.۹	۰.۷	۱۰۰ µg/mL =۰.۰۳۳ ABS	۳	–
Sb	۲۱۷.۶ ۲۳۱.۲	۰.۲ ۰.۷	۲۰ µg/mL =۰.۱۸ ABS	۱ ۱	برای اندازه‌گیری در حضور Pb از طول موج ۲۳۱.۲ nm را استفاده نمایید.
Se	۱۹۶	۰.۲	۲۰ µg/mL =۰.۰۷ ABS	۵	لامپ غیر از هالوکاتد به‌صورت Electrodeless Discharge Lamp (EDL) را استفاده نمایید.
Sn	۲۲۴.۶	۰.۷	۲۰ µg/mL =۰.۱۸ ABS	۵	–
Te	۲۱۴.۳	۰.۲	۵۰ µg/mL =۰.۲۸ ABS	۱	–
Ti	۳۶۵.۳	۰.۲	۲۵ µg/mL =۰.۱۱ ABS	۳	–
Tl	۸۲۷۶.۸	۰.۷	۱۲۰ µg/mL =۰.۳ ABS	۱	–
Y	۴۱۰.۲	۰.۲	۲۰ µg/mL =۰.۱۸ ABS	۳	–
Zn**	۲۱۳.۹	۰.۷	۱۰۰ µg/mL =۰.۲۴ ABS	۱	در حضور Cu لامپ چند عنصری شامل Cu را استفاده ننمایید.
Zr	۳۶۰.۱	۰.۲	۰.۵ µg/mL =۰.۱۲ ABS	۳	–

اقتباس از مرجع شماره ۸.۶ روش ۱۲۱ سازمان OSHA یا از تجربیات آزمایشگاهی کارشناسان ACGIH

** به دلیل محدود بودن دامنه خطی روش، امکان دارد که نمونه‌ها رقیق شوند، سر مشعل چرخانده شود یا از طول موج جایگزین با حساسیت اندازه‌گیری کمتر استفاده شود. سر مشعل به‌طور معمول برای تجزیه آهن و منیزیم چرخانده می‌شود.

نوع شعله مناسب:

۱) **مخلوط هوا/استیلن، شعله با تراکم سوخت کمتر، شعله آبی**
۲) **مخلوط هوا/استیلن، شعله با تراکم سوخت خیلی کمتر، شعله آبی**
۳) **مخلوط اکسید نیتروژن/استیلن، شعله غنی شده از سوخت و قرمز**
۴) **مخلوط اکسید نیتروژن / استیلن، شعله با غنای کمتر از سوخت، شعله قرمز**
۵) **مخلوط هوا/هیدروژن**

و) محاسبه تراکم یا غلظت ترکیبات اندازه‌گیری شده

حجم نمونه‌های مورد و استاندارد در شرایط متعارف به میزان ۲۵ میلی‌لیتر است و نمونه‌های استاندارد حداقل به تعداد ۶ مورد می‌بایست تهیّه و به دستگاه‌های طیف‌سنج جذب و نشر اتمی داده شود. فرمول خط کالیبراسیون بر اساس غلظت‌های استاندارد یا جرم بر نمونه، با استفاده از نرم‌افزار EXCEL یا روش آماری least-squares به‌دست آورده می‌شود و سپس غلظت نمونه‌ها از طریق فرمول خط کالیبراسیون محاسبه می‌گردد. در مرتبه بعد غلظت ترکیبات فلزی در هوای محیط کار با فرمول زیر محاسبه می‌شود:

$$C=\frac{[(A.xSAxDxGF)-(BxSBxGF)]}{V}$$

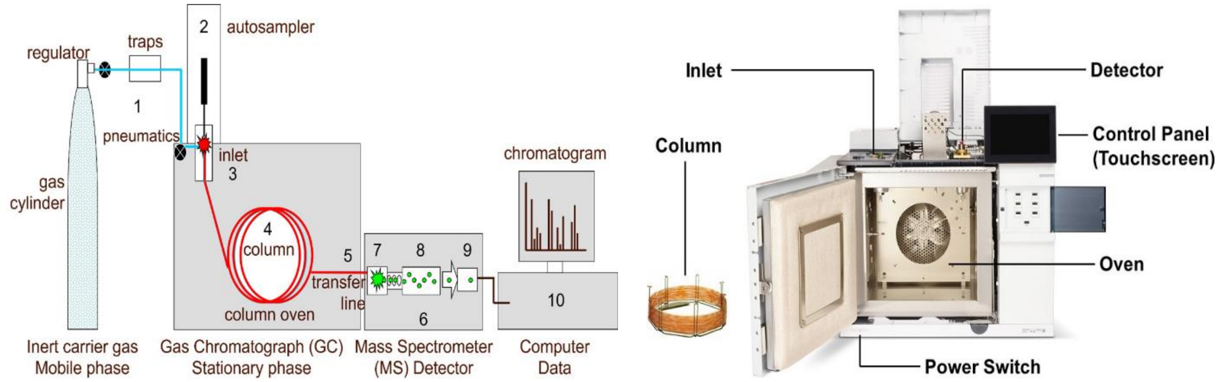
که در آن:

C= غلظت نمونه در هوا بر حسب (mg/m^3)
A= غلظت در نمونه مجهول (µg/mL)
SA= حجم نمونه مورد بر حسب (mL)
GF= فاکتور تبدیل وزن ترکیب بر اساس وزن اتمی عنصر
B= غلظت نمونه شاهد بر اساس (µg/mL)
SB= حجم نمونه شاهد بر حسب (mL)
V= حجم نمونه‌برداری فردی (حاصلضرب گذر حجمی و زمان نمونه‌برداری)

توصیه به کارشناسان و متخصصین بهداشت حرفه‌ای

فهرست پروژه‌های پژوهشی آذری و همکاران در زمینه طیف‌سنجی اتمی در بخش منابع آورده شده و گوشزد می‌شود که کارشناسان محترم بهتر است اصل مقالات منتشر شده در ژورنال‌های علمی را مطالعه نمایند. زیرا در این بخش از کتاب فقط شمه مختصری از چند پروژه پژوهشی آورده شد. در خاتمه برای توجیه اهمیت روش‌های آنالیز جذب و نشر اتمی، لینک شناسایی روش‌های نمونه‌برداری و آنالیز زیر برای کارشناسان محترم ارائه می‌شود. لازم به یادآوری است که در فصل ۸ با عنوان انتخاب روش‌های ارزشیابی مواجهه شغلی کارکنان، اهمیت روش آنالیز جذب اتمی برای تعدادی از ترکیبات شرح داده خواهد شد.

https://yiqi-oss.oss-cn-hangzhou.aliyuncs.com/aliyun/900101420/solution/213549.pdf



۶–۱–۴) دستگاه کروماتوگرافی گازی

کروماتوگرافی گازی (GC)[1] یک روش آنالیز دستگاهی برای جداسازی ترکیبات آلی در فاز گازی است. ترکیبات پس از جداسازی در ستون در این سیستم توسط آشکارساز شناسایی و اندازه‌گیری می‌شوند. روش‌های گاز کروماتوگرافی برای تشخیص کمّی و کیفی ترکیبات آلی در صنایع دارویی، شیمیایی، غذایی، تولید آفت‌کش، نفت، پتروشیمی، محیط زیست و سم‌شناسی به‌کار برده می‌شوند.

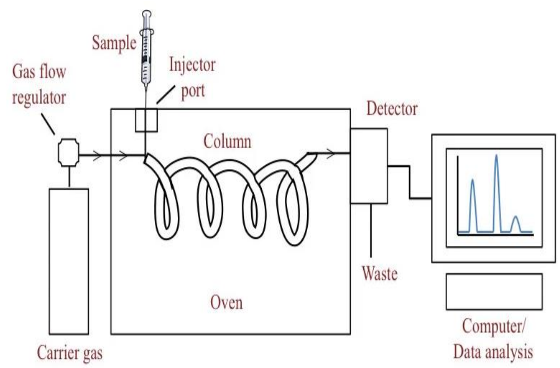
تاریخچه ابداع و سیر تکاملی این سیستم آنالیز دستگاهی مانند سایر روش‌های پیشرفته آنالیز، به زمان جنگ جهانی دوم بر می‌گردد. مخترع دستگاه کروماتوگرافی گازی و برنده جایزه نوبل در سال ۱۹۵۲، فردی به نام Martin است. این روش آنالیز دستگاهی در دهه‌های اخیر تکامل یافته است و در حال حاضر یکی از دستگاه‌های اصلی تجزیه کمّی و کیفی ترکیبات آلی با به‌کارگیری انواع مختلفی از آشکارسازهای متفاوت است.

۶–۱–۴–۱) اصول دستگاه گازکروماتوگرافی

دستگاه گازکروماتوگرافی به‌عنوان یک دستگاه آنالیزکننده ترکیبات آلی شامل بخش‌های مختلف: منبع گاز حامل (گازهای خنثی مانند نیتروژن، آرگون و هلیوم با درجه خلوص نزدیک به ۱۰۰٪)، فلومتر و کنترل‌کننده

[1] Gas Chromatography

جریان گاز به دستگاه، محل تزریق نمونه، ستون کروماتوگرافی (جداساز ترکیبات)، کوره دستگاه عامل حرارتی برای ستون و آشکارساز متصل به پردازشگر برای محاسبات جرم نمونه و ثبت داده‌ها، است (شکل ۳۶-۶).





شکل ۳۶-۶) تصویری از یک دستگاه گازکروماتوگرافی و اجزای سازنده آن شامل کپسول حامل فاز متحرک، کنترل‌کننده جریان فاز متحرک، درگاه تزریق نمونه، ستون جداساز ترکیبات، آشکارساز و کامپیوتر

فاز متحرک سیستم گازکروماتوگرافی شامل یکی از گازهای خنثی مانند: هلیوم (He)، نیتروژن (N_2) و آرگون (Ar) است. گاز حامل با سرعت ثابتی با تنظیم رگلاتور وارد سیستم GC می‌شود. قبل از ورود گاز حامل به ستون، از درگاه تزریق[1] نمونه‌ها عبور کرده و با پیش راندن نمونه تزریق شده، آن را به ستون وارد می‌کند. پس از جداسازی ترکیبات از یکدیگر در ستون دستگاه، هر ترکیب با یک تفاوت زمانی به سیستم آشکارساز وارد می‌شود. سه قسمت درگاه تزریق و ستون کروماتوگرافی و آشکارساز می‌بایست در دمای مناسب، نگهداری شوند. نمونه تزریق شده به درگاه تزریق سریعاً تبخیر می‌شود و همراه با گاز حامل وارد ستون می‌شود. ستون‌های کروماتوگرافی دارای پوشش داخلی از جنس پلیمرهای مایع از سیلیکون مقاوم به حرارت تا ۴۰۰ درجه سانتیگراد هستند. ورود ترکیبات به ستون منجر به فرایند مکرر انحلال و تبخیر نمونه در فاز ثابت ستون می‌شود. بر اساس خواص فیزیکوشیمیایی نمونه تزریق شده مانند نقطه جوش و میزان قطبیت، ترکیبات موجود در آن با زمان ماندگاری متفاوت در ستون

[1] Injector Port

از یکدیگر جداسازی می‌شوند. به‌طور کلی سرعت عبور هر ترکیب در داخل ستون متناسب با ساختار فیزیکی و شیمیایی ترکیب و همچنین نوع ستون کروماتوگرافی و چگونگی قطبیت پوشش داخلی ستون است. لازم به‌ذکر است که ستون‌های کروماتوگرافی می‌بایست بر اساس جداسازی ترکیبات هدف، انتخاب شوند.

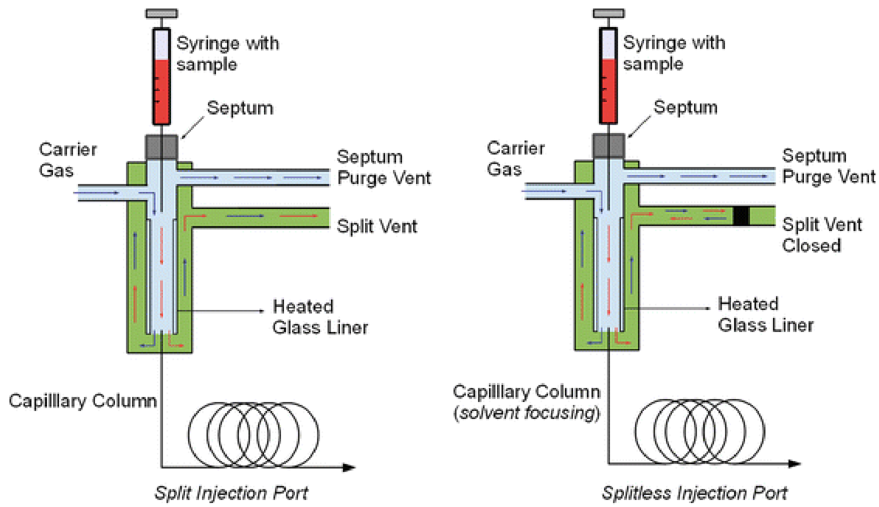
ستون سیستم کروماتوگرافی گازی به یک سیستم آشکارساز متصل می‌شود و هنگامی که ترکیبات شیمیایی از ستون عبور نموده و به آشکارساز می‌رسند، عامل ایجاد سیگنال‌های خاصی در سیستم آشکارساز می‌شود که مرتبط با ترکیبات جداسازی شده می‌باشد. سیگنال‌های تولید شده، پس از تقویت به پردازشگر سیستم می‌رسد و ثبت می‌گردد. با تجزیه و تحلیل سیگنال‌های الکتریکی در آشکارساز، سیستم آنالیز دستگاهی GC قادر به شناسایی نمونه‌ها و تعیین مقدار آن خواهد بود. لازم به‌ذکر است که سیستم‌های آشکارساز به‌صورت گروهی و اختصاصی برای ترکیبات متفاوت تحت شرایط تنظیم خاص برای هر ترکیب یا گروهی از ترکیبات به‌کار برده می‌شوند که در بخش‌های بعدی توضیحات لازم ارائه خواهد شد.

۶-۱-۴-۲)   کاربرد سیستم کروماتوگرافی گازی

سیستم دستگاهی GC برای بخش‌های مختلف صنعتی، محیط زیست و سم‌شناسی استفاده می‌شود. کاربرد این سیستم تجزیه کننده دستگاهی در رشته مهندسی بهداشت حرفه‌ای نیز برای تعیین میزان مواجهه‌های شغلی تنفسی کارکنان در بخش‌های مختلف شغلی است.

تزریق نمونه‌های شیمیایی به دستگاه گازکروماتوگرافی از طریق یک سرنگ میکرولیتری انجام می‌شود. بعد از تزریق نمونه‌های آلی به درگاه تزریق که مجهز به سیستم حرارتی است، نمونه سریعاً تبخیر می‌گردد و همراه گاز حامل به ستون وارد می‌شود. تزریق نمونه به‌صورت شکسته شده (Split) در شرایطی است که بعد از تبخیر نمونه تزریق شده بخشی از مواد تبخیر شده قبل از ورود به ستون کروماتوگرافی شکسته شده و از سیستم خارج می‌شود و شرایط شکسته شدن مرتبط با تراکم مناسب ترکیب بعد از تبخیر در درگاه تزریق است. در شرایط تزریق شکسته

نشده (Splitless) برای شرایط غلظت کم نمونه، تمام ترکیبات تزریق شده تبخیر می‌شود و برای تقویت سیگنال وارد ستون کروماتوگرافی و سپس آشکارساز می‌شوند (شکل ۳۷-۶).



شکل ۳۷-۶) درگاه تزریق نمونه در دو وضعیت تزریق بدون شکسته شدن Splitless و تزریق شکسته شده Split

وضعیت شکسته شدن جریان تزریق نمونه، نقش مهمی در محافظت ستون از بار اضافی و افزایش طول عمر آن دارد و همچنین باعث ارتقای کیفیت سیگنال‌های کروماتوگرافی گازی می‌شود. در شرایط معمول تجزیه، وضعیت تزریق نمونه‌ها به‌صورت Split است که درصدی از نمونه تزریق شده را به ستون وارد می‌کند.

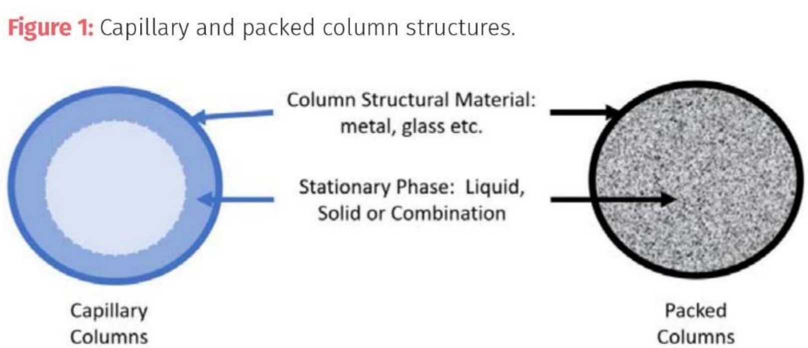
درصد شکسته شدن نمونه‌ها در درگاه تزریق مرتبط با تراکم نمونه و حساسیت دستگاه آشکارساز است که به‌طور معمول در حدود ۱۰٪ الی ۵۰٪ از حجم نمونه تزریق شده است که به ستون کروماتوگرافی وارد می‌شود و مابقی از سیستم خارج می‌گردد.

۶-۱-۴-۳) ستون‌های گازکروماتوگرافی

ستون‌های استفاده شده برای جداسازی ترکیبات در سیستم گازکروماتوگرافی به‌صورت ستون پر شده[1] و یا ستون موئینه[2] است. ستون‌های پر شده به لحاظ کارآمدی کم در جداسازی ترکیبات، امروزه دارای کاربرد قابل ملاحظه‌ای نمی‌باشند و ستون‌های کروماتوگرافی در سال‌های اخیر بیشتر به‌صورت موئینه مورد استفاده قرار می‌گیرند (شکل ۳۸-۶).



شکل ۳۸-۶) تصویری از ستون‌های پر شده (سمت چپ) و ستون موئینه (سمت راست)



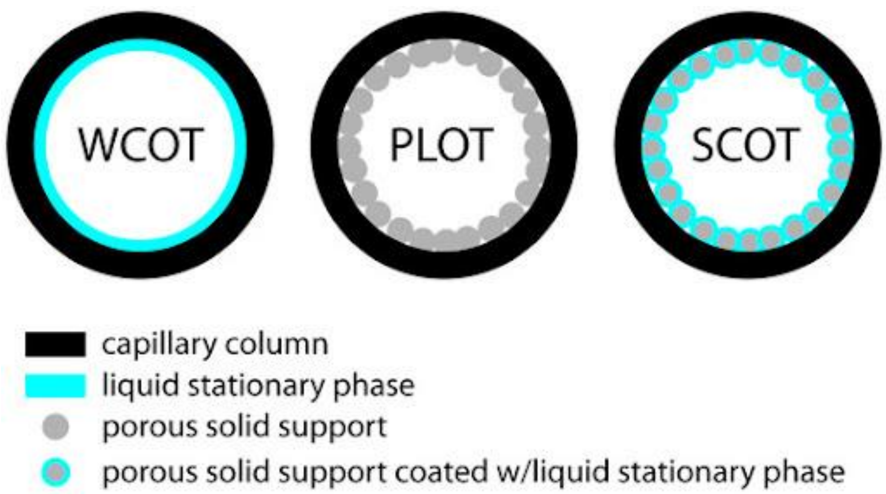
شکل ۳۹-۶) برشی از سطح مقطع ستون‌های پر شده (سمت چپ) و موئینه (سمت راست)

[1] Packed Column
[2] Capillary Column

۶-۱-۴-۳-۱) اقسام ستون‌های موئینه

ستون‌های موئینه GC به ۳ دسته ستون‌های لوله‌باز با روکش داخلی از مخلوطی از میکروذرات سیلیکاژل و ذرات اکسید آلومینیوم (Al_2O_3) و مایعات خاص (SCOT)[1]، ستون لوله‌باز با پوشش دیواره از فاز ثابت پلی‌سیلوکسان[2] و یا پلیمرهای دیگر (WCOT)[3] و ستون لوله باز با پوشش داخلی از مواد جاذب متخلخل مانند پلیمرها و ذرات اکسید آلومینیوم (PLOT)[4] تقسیم می‌شوند (شکل ۴۰-۶).

ستون‌های WCOT که رایج‌ترین ستون‌های موئینه مورد استفاده است به‌صورت یک لوله باز است که دارای یک پوشش داخلی در فاز مایع از پلیمرهای مختلف پلی‌سیلوکسان یا پلیمرهای دیگر است که به حرارت مقاوم بوده و دارای قابلیت حل‌کنندگی ترکیبات است (شکل ۴۰-۶)



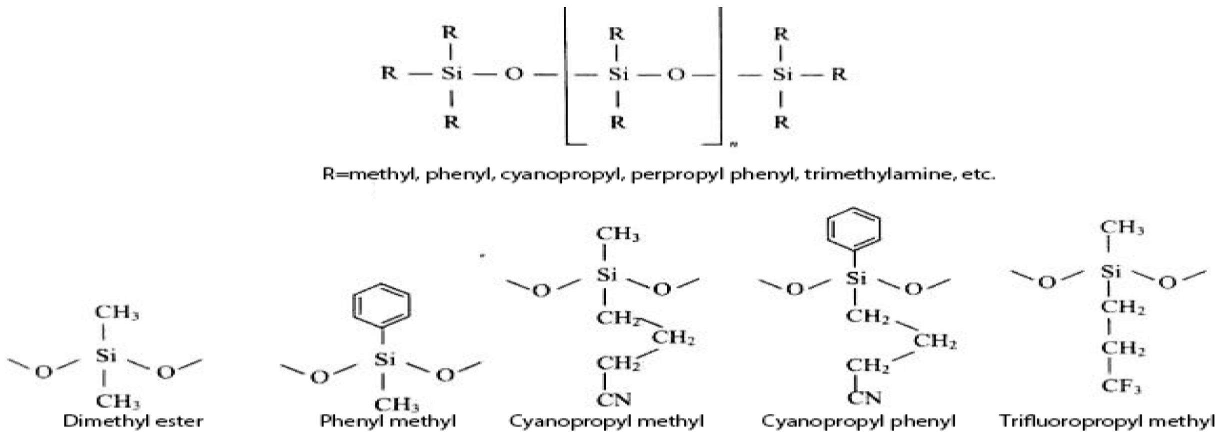
شکل ۴۰-۶) نمای سطح مقطع ستون‌های موئینه مختلف

ساختار ستون‌های موئینه به‌خصوص نوع WCOT در دهه‌های اخیر توسعه یافته است و به‌طور گسترده‌ای استفاده می‌شوند. ستون‌های موئینه به‌طور معمول دارای قطر داخلی ۰.۱-۰.۵۳ میلی‌متر و طول ۱۰۰-۱۰ متر هستند. ساختار ستون به‌شکل یک لوله موئینه از جنس سیلیس است و عامل جداسازی در آن، یک لایه مایع از

---

[1] support-coated open tubular
[2] Polysiloxane
[3] Wall-coated open-tubular
[4]

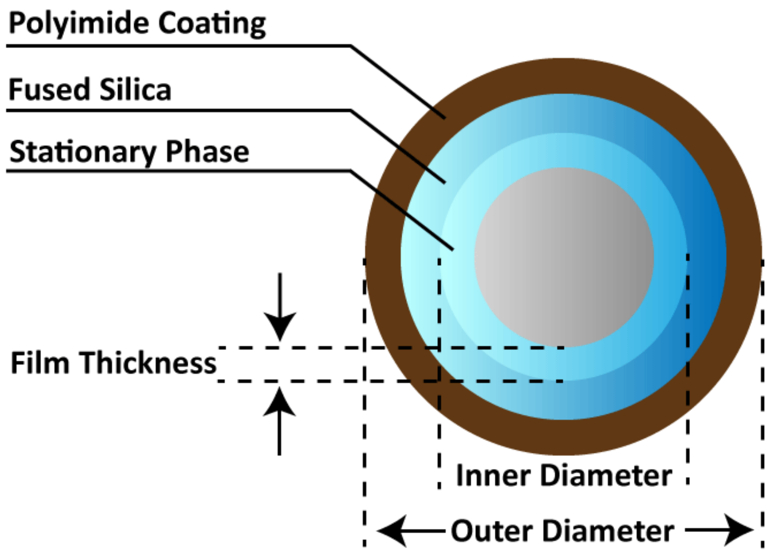
پلیمرهای پلی‌سیلوکسان به اشکال و میزان قطبیت‌های متفاوت است که به جدار داخلی لوله موئینه چسبیده‌اند (شکل ۴۱-۶).



شکل ۴۱-۶) ترکیبات مختلف پلی‌سیلوکسان مورد استفاده در ستون‌های موئینه

همان‌طور که در شکل ۴۲-۶ نشان داده شده است، سطح داخلی ستون کروماتوگرافی سیلیکای فیوز شده (FSOT)[1] دارای یک لایه از ترکیبات پلیمرهای سیلوکسان به قطر ۰.۰۱-۰.۰۵ میلی‌متر و در حالت فیزیکی مایع است و جدار ستون نیز از جنس سیلیکای فیوز شده (سیلیس خالص غیرکریستالی) ساخته شده است که جدار خارجی آن دارای یک لایه به نام پلی‌آمید[2] برای دادن استحکام بیشتر به ستون می‌باشد. ستون‌های موئینه به‌کار برده شده در اکثر موارد دارای قطر داخلی با ابعاد ۰.۲۵ میلی‌متر و طول ۳۰ متر است.

[1] Fused Silica Open Tubular
[2] Polyamide



شکل ۴۲-۶) ساختار ستون موئینه FSOT

۶-۱-۴-۳-۲) انتخاب ستون برای آنالیز ترکیبات آلی مختلف

دیواره ستون خنثی است و فقط پایه‌ای برای ساختاربندی ستون است. سطح داخلی ستون از یک لایه مایع از جنس پلیمرهای سیلیکونی (فاز ثابت) پوشیده است. ترکیبات پلی‌سیلوکسان دارای قطبیت‌های متنوع می‌باشند که استفاده از هر یک از آنها در ستون‌های موئینه، نوع کاربرد ستون را برای آنالیز ترکیبات مشخصی با ساختارهای شیمیایی خاص تعریف می‌کند (شکل ۴۱-۶).

در تمامی روش‌های کروماتوگرافی، جداسازی ترکیبات بر پایه مقدار آنالیت در دو فاز ثابت و متحرک انجام می‌شود. نسبت مقادیر آنالیت بر حسب مولار در دو فاز متحرک، با مفهوم فاز تعادلی (K) مطرح می‌شود:

$$K=\frac{Cs}{Cm}$$

که در آن:

C_S: تراکم آنالیت در فاز ثابت

C_m: تراکم آنالیت در فاز متحرک

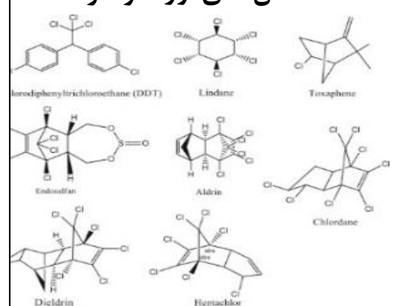
طبق رابطه فوق هر چقدر ضریب تعادلی K بیشتر باشد، ترکیب در مدت زمان بیشتری از ستون خارج خواهد شد. از این‌رو با توجّه به ساختار شیمیایی ترکیب، نوع ستون کروماتوگرافی برای ترکیب یا ترکیبات هدف انتخاب می‌شود.

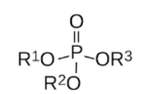
ترکیبات آلی دارای ساختار اصلی متشکل از اتم‌های کربن و هیدروژن هستند که کم و بیش غیر قطبی است ولی شاخه‌های عاملی این ترکیبات به‌صورت آمید، اسید، الکل، کتون، آلدئید، آمین، استر و اتر هستند که میزان قطبیت ستون را تعیین می‌کنند. میزان قطبیت از دامنه زیاد تا کم ترکیبات آلی به ترتیب زیر می‌باشند:

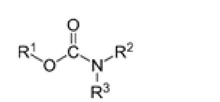
Amide > Acid > Alcohol > Ketone ~ Aldehyde > Amine > Ester > Ether > Alkane

انتخاب ستون کروماتوگرافی پس از تشخیص میزان قطبیت ترکیبات، انجام می‌شود. در این زمینه میزان قطبیت ستون‌های موئینه WCOT که متداول‌ترین ستون GC است، می‌بایست با توجّه به پوشش داخلی ستون مشخص شود (جدول ۱۰-۶). پس از تشخیص ماهیت ساختاری ترکیبات مورد نظر برای کروماتوگرافی، ستونی انتخاب می‌شود که دارای قطبیت مشابهی با ترکیب یا ترکیبات مورد آنالیز باشد.

جدول ۱۰-۶) ستون‌های WCOT با قطبیت‌های مختلف و کاربرد آنها برای آنالیز ترکیبات شیمیایی

<table>
<tr><th>نوع ترکیبات آلی</th><th>فاز ثابت لایه پوششی ستون‌های WCOT</th><th>میزان قطبیت ترکیبات</th></tr>
<tr><td>ترکیبات غیر قطبی C-H و C-C
آلکان‌ها ترکیبات اشباع شده خطی
$C_nH_{2n}^{+2}$</td><td>BP1
100%Dimethylpolysiloxane</td><td>غیر قطبی</td></tr>
<tr><td>ترکیبات قطبی ضعیف
ترکیبات C-H
ترکیبات کربن با پیوست‌های Br,
Cl, F, N, O, P, S</td><td>BP5
5% Phenyl Polysiloxane Phase
6% Cyanopropylphenyl 94% Dimethylpolysiloxane</td><td>کم</td></tr>
<tr><td>آفت‌کش های اورگانوکلره


ترکیبات اورگانو فسفره


ترکیبات کاربامات ها

</td><td>BP10
Cyanopropylphenyl Polysiloxane
4% Cyanopropylphenyl 96% Dimethylpolysiloxane
یا
50% Methylpolysiloxane 50% Phenyl</td><td>متوسط</td></tr>
<tr><td>ترکیبات سبک شامل الکل‌ها، آمین‌ها، اسیدها، استرها، اترها و ترکیبات آلی با شاخه SH</td><td>BP20 - Polyethylene Glycol
Trifuoropropylmethylpolysiloxane
90%Biscyanopropyl10%Cyanopropylphenylpolysiloxane</td><td>ترکیبات قطبی قوی</td></tr>
</table>

۶-۱-۴-۳-۳) قطر داخلی ستون موئینه

قطر داخلی ستون‌ها در ابعاد میلی‌متری و مرتبط با تعداد سینی‌های فرضی در طول چند متر ستون و ظرفیت پذیرش آنالیت بر حسب نانوگرم است (جدول ۱۱-۶).

جدول ۱۱-۶) قطر داخلی ستون و میزان بار گیری آن

قطر داخلی ستون (mm)	راندمان ستون در هر متر از ستون (N/M)	راندمان کل ستون (N)	ظرفیت ستون برای بارگیری (ng)
۰.۵۳	۱۳۰۰	۳۹۰۰۰	۱۰۰۰-۲۰۰۰
۰.۳۲	۲۳۰۰	۶۹۰۰۰	۴۰۰-۵۰۰
۰.۲۵	۲۹۲۵	-	۵۰-۱۰۰
۰.۲۰	۳۶۵۰	۸۷۷۵۰	< ۵۰
۰.۱۸	۴۰۵۰	۱۰۹۵۰۰	< ۵۰
۰.۱۰	۷۳۰۰	۱۲۱۵۰۰	< ۱۰

۶-۱-۴-۳-۴) ضخامت لایه فاز ثابت در ستون GC

ضخامت لایه فاز ثابت در ستون‌هایی با قطر داخلی ۰.۲۵ mm در حدود ۲۵ یا ۵۰ میکرومتر است. لازم به‌ذکر است که بر اساس کاربرد ستون‌ها، بهترین ضخامت لایه فاز ثابت برای جداسازی ترکیبات در دامنه ۲۵ یا ۵۰ میکرومتر می‌باشد. به‌طور کلی افزایش ضخامت فاز ثابت باعث افزایش قدرت تفکیک و جداسازی پیک‌ها می‌شود امّا زمان ماندگاری طولانی‌تر آنالیت‌ها در ستون و کاهش مقاومت حرارتی ستون را نیز به دنبال دارد. از طرفی کاهش ضخامت لایه فاز ثابت ضمن کاهش زمان ماندگاری آنالیت‌ها در ستون و افزایش مقاومت حرارتی ستون منجر به کاهش قدرت تفکیک پیک‌ها از یکدیگر می‌شود. با توجّه به فواید و مشکلات ضخامت لایه فاز ثابت در زمینه کیفیت پیک‌ها و ظرفیت تحمل حرارتی و مدت زمان لازم برای آنالیز هر نمونه، انتخاب ستون برای آنالیز هر گروه از ترکیبات بایستی به‌طور دقیق انجام شود.

به‌طور کلی ضریب β نشان‌دهنده تأثیر ضخامت لایه فاز ثابت مرتبط با قطر داخلی ستون است و نسبت حجم گاز در داخل ستون به حجم فاز ثابت را مشخص می‌سازد. ضریب β در انتخاب ستون با در نظر گرفتن دو فاکتور قطر داخلی ستون و ضخامت لایه فاز ثابت به‌شرح زیر محاسبه می‌شود:

$$\beta = \frac{\text{شعاع ستون } (\mu m)}{2 \times \text{لایه پوشش فاز ثابت } (\mu m)}$$

که در آن:

β= نسبت شعاع ستون به لایه پوششی فاز ثابت

جدول ۱۲-۶) کاربرد ضریب β در انتخاب ستون دستگاه GC

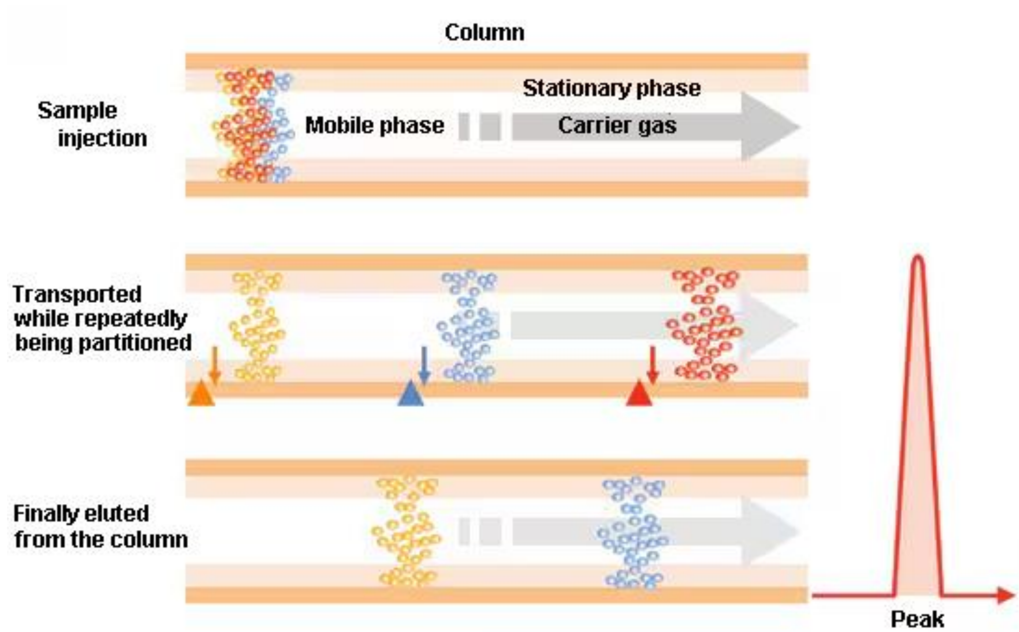
کاربرد ضریب برای ترکیبات مختلف	ضریب β
ترکیبات خیلی فرار با وزن مولکولی کم	۱۰۰ >
برای آنالیزهای معمول تعداد زیادی از ترکیبات	۴۰۰-۱۰۰
وزن مولکولی زیاد و آنالیز ترکیبات در غلظت‌های کم	۴۰۰ <

۵-۳-۴-۱-۶)   طول ستون موئینه

طول ستون می‌تواند تا ۱۰۰ متر باشد. افزایش در طول ستون ضمن افزایش امکان جداسازی منجر به زمان ماندگاری بیشتر آنالیت‌ها در ستون کروماتوگرافی می‌شود. به‌طور کلی یک ستون ۳۰ متری بهترین تعادل کیفیت جداسازی، زمان آنالیز و افت فشار مورد نیاز را برای رانش ترکیبات در ستون فراهم می‌کند. علی‌رغم این موضوع، در شرایط خاص ستون‌هایی با طول بیشتر نیز برای جداسازی ترکیبات مورد استفاده قرار می‌گیرند.

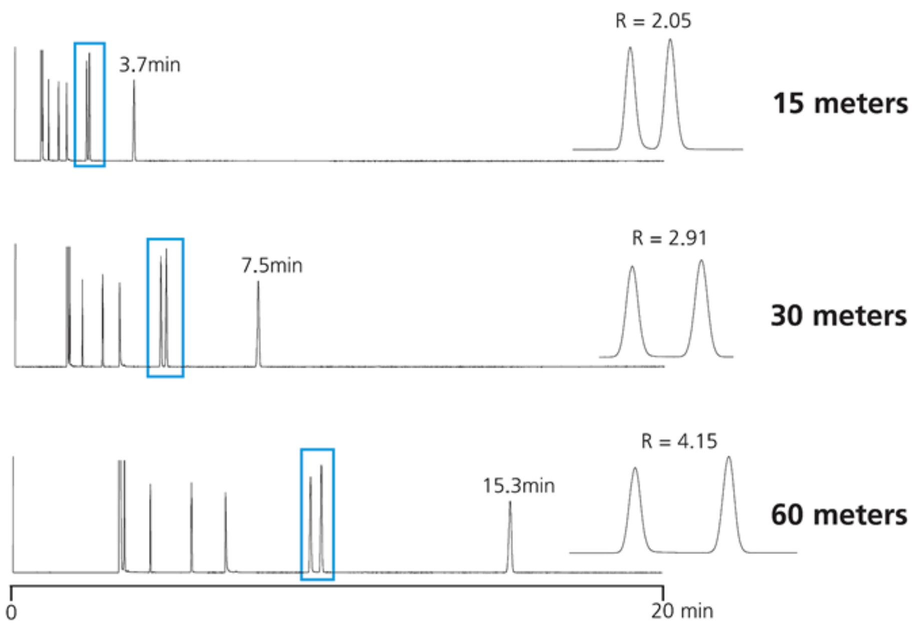
ستون‌های با طول بیشتر از ۳۰ متر: باعث افزایش کیفیت جداسازی می‌شود، امّا نیاز به فشار بیشتری برای رانش ترکیبات در ستون دارد. ضمناً لازم به تذکر است که ارتباط مستقیمی بین افزایش طول ستون و افزایش راندمان جداسازی وجود ندارد. به عبارت دیگر دو برابر شدن طول ستون قدرت تفکیک ترکیبات را دو برابر

نمی‌کند. به‌طور کلی ضریب تفکیک تنها متناسب با جذر طول ستون افزایش می‌یابد. اگر قدرت تفکیک پیک‌ها در یک کروماتوگرام کمتر از ۱ باشد، دو برابر کردن طول ستون آن را به عدد مبنای مورد قبول نمی‌رساند (ضریب تفکیک مورد قبول حداقل ۱.۵ است). افزایش طول ستون برای افزایش قدرت تفکیک باید به عنوان آخرین راه‌حل در نظر گرفته شود.



شکل ۴۳-۶) مراحل جداسازی ترکیبات در ستون دستگاه GC

ستون‌های با طول کمتر از ۳۰ متر: این ستون‌ها زمانی که ضریب تفکیک پیک‌های کروماتوگرافی زیاد مورد نیاز نباشد (مانند اهداف غربالگری یا نمونه‌های ساده‌ای که اجزای آن از نظر ماهیت شیمیایی متفاوت هستند) به‌کار برده می‌شوند. با این حال، اگر قطر داخلی ستون همراه با کاهش طول ستون باشد، ضریب تفکیک را می‌توان در میزان قابل قبول حفظ کرد و یا در برخی موارد آن را افزایش داد.

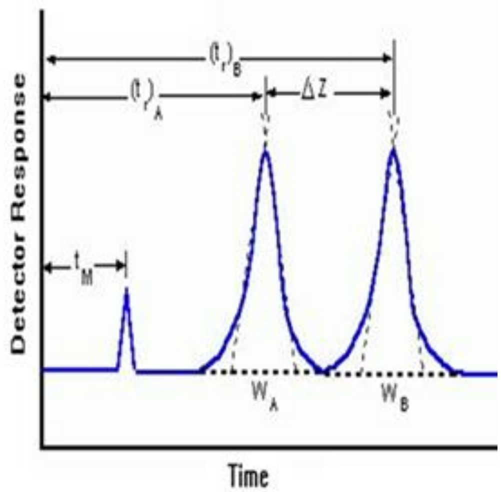


شکل ۴۴-۶) تأثیر طول ستون بر کیفیت پیک‌های کروماتوگرافی

۶-۱-۴-۳-۶) ضریب تفکیک پیک‌های ترکیبات جداسازی شده در ستون‌های کروماتوگرافی

تفکیک پیک‌ها از یکدیگر به ترتیبی که از خط پایه کروماتوگرام جدا از یکدیگر نمایش داده شوند، قابل قبول خواهد بود. قدرت تفکیک بر مبنای فرمول زیر محاسبه می‌شود (شکل ۴۵-۶) و حداقل R_S قابل قبول می‌بایست در حدود ۱ و به‌صورت ایده‌آل برابر با ۱.۵ باشد.

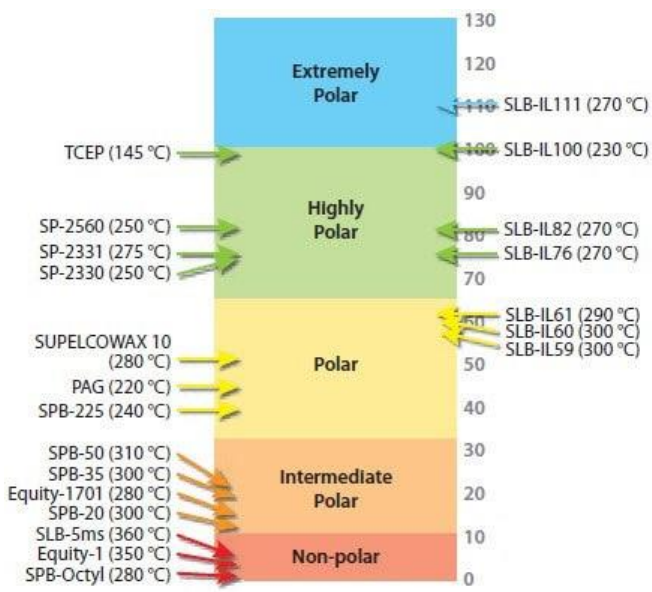
$$R_S = \frac{2\Delta Z}{W_A + W_B} = \frac{2[(t_R)_A - (t_R)_B]}{W_A + W_B}$$



شکل ۴۵-۶) تفکیک پیک‌های دو ترکیب به میزان قابل قبول

۶-۱-۴-۳-۷) دامنه مقاومت حرارتی متعارف ستون‌های کروماتوگرافی گازی

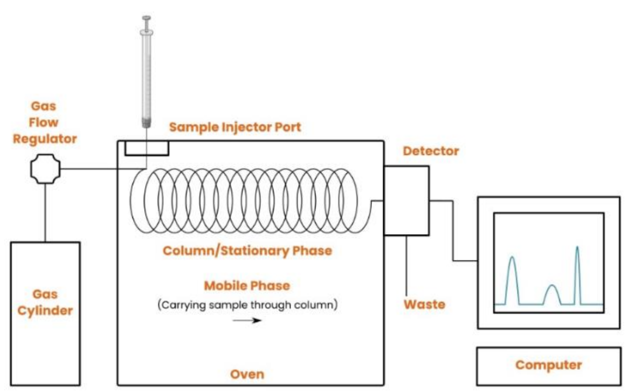
مقاومت حرارتی (حداکثر دمای) ستون‌های دستگاه کروماتوگرافی گازی بستگی به نوع و ضخامت لایه فاز ثابت دارد و غالباً توسط شرکت‌های سازنده برای ستون‌های مختلف ارائه می‌شود (شکل ۴۶-۶).



شکل ۴۶-۶) مقاومت حرارتی ستون‌های مختلف برای ترکیباتی با قطبیت‌های مختلف برحسب درجه سانتیگراد و کد ستون

۶-۱-۴-۴) گرمخانه سیستم کروماتوگرافی

سیستم کروماتوگرافی گازی دارای یک اتاقک گرمخانه[1] برای حرارت‌دهی به ستون کروماتوگرافی است. اتاقک گرمخانه‌ای وظیفه کنترل حرارت ستون برای تبدیل ترکیبات تزریق شده به فاز گازی را بر عهده دارد. سیستم حرارت‌دهی گرمخانه مجهز به ترموستات بسیار حساس برای حرارت‌دهی با دقّت ۰.۱ درجه سانتی‌گراد است. به‌طورکلی حرارت ستون به دو صورت ثابت یا همدما[2] یا متغیر با شیب حرارتی[3] کنترل می‌شود. سیستم‌های دستگاهی مدرن تنظیم حرارتی را به‌صورت برنامه‌ریزی شده انجام می‌دهند. برنامه‌ریزی سیستم حرارتی دستگاه گرمخانه‌ای با توجّه به نقطه‌جوش ترکیبات هدف برای آنالیز انتخاب می‌شود و از طریق آزمون‌وخطا برای شرایط ویژه یک نمونه خاص بهینه‌سازی می‌گردد. به‌طورکلی برنامه‌ریزی حرارتی متغیر برای جداسازی مجموعه‌ای از ترکیبات از یکدیگر بر اساس بهترین شرایط جداسازی در حداقل بازه زمانی یک دوره از آنالیز استفاده می‌شود. برنامه‌ریزی حرارتی به‌صورت ثابت یا همدما در شرایطی به کار گرفته می‌شود که نمونه ساده باشد و پیچیدگی نمونه‌های مختلط را نداشته باشد. مشخصات برنامه‌ریزی نمونه‌ها از طریق اطلاعات داده شده روش‌های مصوب ارائه می‌شود ولی متخصص شیمی آنالیز در صورت لزوم با اطلاع از ترکیبات مختلف می‌تواند در برنامه‌ریزی حرارتی دستگاه کروماتوگرافی گازی دخالت نموده و بهترین وضعیت کاری دستگاه را برای آنالیز ترکیبات تشخیص دهد.



شکل ۴۷-۶) سیستم گرمخانه دربردارنده ستون در دستگاه GC

[1] Oven
[2] Isothermal
[3] Gradient Temperature

ازآنجایی‌که گاز حامل نهایتاً وارد آشکارساز دستگاه می‌شود لازم است که دارای درجه خلوص بالایی باشد (> ۹۹.۹۹۵٪) زیرا در غیر این صورت خط پایه کروماتوگرام همراه با پارازیت خواهد شد و حساسیت سیستم برای تشخیص کیفی به‌صورت کمترین مقدار جرم[1] قابل تشخیص و همچنین کمترین جرم ترکیب تزریق شده برای تشخیص کمّی[2] را تحت تأثیر قرار می‌دهد.

جدول ۱۳-۶) کارایی سیستم‌های آشکارساز GC برای ترکیبات مختلف

نوع ترکیبات برای آنالیز	حداقل تراکم قابل‌شناسایی	سیستم آشکارساز	نوع سیستم آشکارساز
تمام ترکیبات در فاز گازی شکل به جز گاز استفاده شده برای فاز متحرک	۱۰ ng	هدایت حرارتی[3]	آشکارسازی کلی
ترکیبات آلی با گروه عاملی هالوژنه ترکیبات آلی جیوه	۰.۰۱ pg	آشکارساز ربایش الکترون[4]	آشکارسازهای انتخابی
ترکیبات آلی	۰.۱ ng	آشکارساز یونیزه کننده ترکیبات در شعله[5]	
ترکیبات آلی سولفوره، فسفره و قلع	۱۰ pg	آشکارساز فتومتریک[6]	
کلیه ترکیبات در فاز گازی شکل و با قابلیت یونیزه شدن به‌صورت یون مثبت	۱۰ng Scan mode ۰.۵ng SIM mode ۱۰pg MRM mode	آشکارساز جرمی[7]	آشکارسازهای شناسایی کننده ترکیباتی با ویژگی خاص

[1] Lowest Level Detectable
[2] Lowest Level Quantitation
[3] Thermal Conductivity (TCD)
[4] Electron Capture Detector (ECD)
[5] Flame Ionization Detector (FID)
[6] Flame Photometric Detector (FPD)
[7] Mass Detector (MS)

۶-۱-۴-۵) آشکارسازهای معمول دستگاه کروماتوگرافی گازی

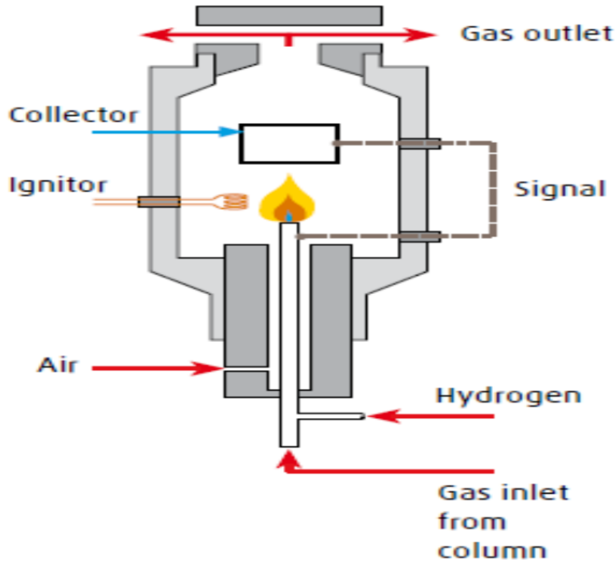
۶-۱-۴-۵-۱) آشکارساز هدایت حرارتی

به‌طورکلی گازهای Ar، He، H_2 و N_2 به‌عنوان گاز حامل در سیستم کروماتوگرافی استفاده می‌شوند. هر گاز حامل دارای قابلیت هدایت حرارتی مخصوص به خود است و در شرایطی که ترکیبات عبوری از آشکارساز از هدایت حرارتی متفاوت از گازهای حامل (کمتر یا بیشتر) برخوردار باشند، باعث پیدایش یک سیگنال می‌شود که در محاسبات آنالیز استفاده می‌گردد. آشکارساز هدایت حرارتی برای شناسایی تمام ترکیبات به استثنای گازهای حامل مناسب است ولی حساسیت به‌مراتب کمتری از آشکارسازهای دیگر دارد. گازهای هلیوم و نیتروژن از بهترین گازهای حامل و دارای بیشترین کاربرد هستند امّا ازآنجایی‌که گاز هلیوم بسیار گران است، در بیشتر موارد از نیتروژن به عنوان گاز حامل استفاده می‌گردد.

۶-۱-۴-۵-۲) آشکارساز یونش شعله

آشکارساز FID برای آشکارسازی تمامی هیدروکربورهای دارای ساختار H-C اشباع‌شده و اشباع نشده کاربرد دارد ولی حساسیت آشکارساز برای ترکیبات اسیدی و آلدئیدی ($CHCOOH$، $HCOOH$، $HCHO$، CH_3CHO) مناسب نیست (جدول ۱۲-۶).

در آشکارساز FID، ترکیبات آلی در شعله آشکارساز و در دمای ۳۰۰۰ تا ۴۰۰۰ درجه سانتی‌گراد سوخته و به ترکیبات یونیزه تبدیل می‌شوند. این ترکیبات یونیزه‌شده جریان الکتریسیته را بین دو الکترود با اختلاف پتانسیل برقرار می‌کنند. در این آشکارساز، فرایند سوختن و تبدیل ترکیبات به حالت یونیزه تنها برای ترکیبات هیدروکربوری اتفاق می‌افتد و برای ترکیبات دیگر از قبیل CO، CO_2، CS_2، ترکیبات آلی با شاخه گروه کربونیل C=Oو ترکیبات با شاخه کربواگزیل COOH- کارایی خوبی ندارد.



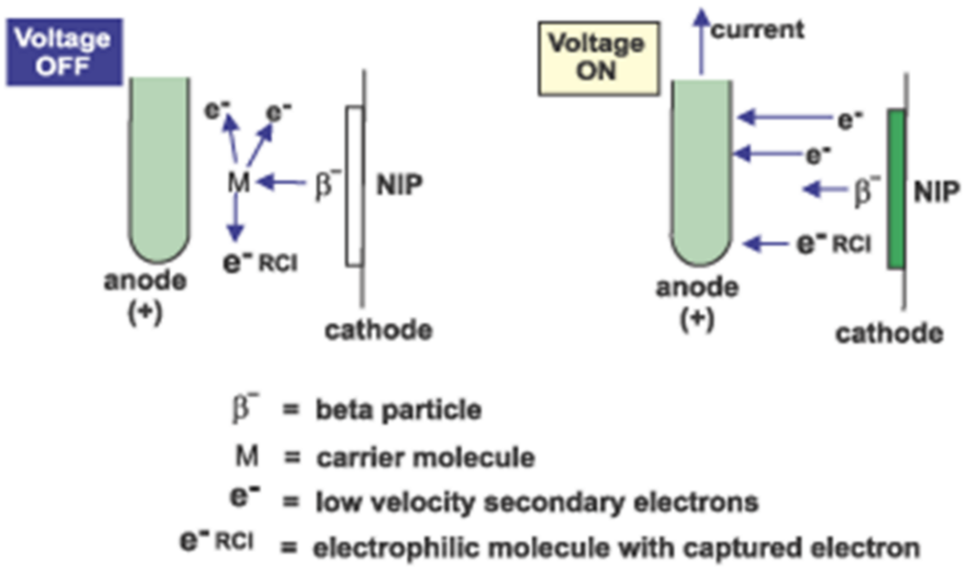
شکل ۴۸-۶) ساختار آشکارساز FID

۶-۱-۴-۵-۳) آشکارساز ربایش الکترونی

آشکارساز ECD به‌طور اختصاصی برای آنالیز ترکیبات الکتروفیل مورد استفاده قرار می‌گیرند. همان‌طور که در شکل ۴۹-۶ دیده می‌شود، آشکارساز ربایش الکترون مجهز به ایزوتوپ‌های رادیواکتیو نیکل Ni^{63} می‌باشند. ذرات بتا، مولکول‌های گاز حامل را یونیزه می‌کنند. در اثر پتانسیل اعمال‌شده (۱ تا ۱۰۰ ولت) بین دو الکترود کاتد و آند، مولکول‌های یونیزه شده فاز متحرک به سمت آند جریان می‌یابند. هنگام ورود ترکیب الکتروفیل از ستون به آشکارساز، ترکیب الکترون‌ها را جذب کرده و باعث کاهش جریان الکتریسیته می‌شود. شدت این کاهش متناسب با مقدار ترکیب ورودی به آشکارساز است. آشکارساز ECD برای آشکارسازی ترکیبات آلی هالوژنه، ترکیبات آلی با شاخه فلزی و ترکیبات آلی با دو شاخه C=O (Diketone) به‌صورت اختصاصی کاربرد دارد. حساسیت آشکارساز به ساختار ترکیب آلی هالوژنه و تعداد شاخه‌های هالوژن بستگی دارد. کاربرد اصلی ECD در تجزیه‌وتحلیل ترکیباتی از قبیل آفت‌کش‌های اورگانوکلره، ترکیبات پلی‌کلرو بی‌فنیل[1]، ترکیبات آلی فرار با شاخه کلر، ترکیبات

[1] PolyChloroBiphenyl Compounds

آلی با شاخه جیوه در آب، خاک، مواد غذایی و هوای محیط است. کارایی آشکارساز ECD برای ترکیبات هالوژنه در جدول ۱۲-۶ نشان داده شده است.

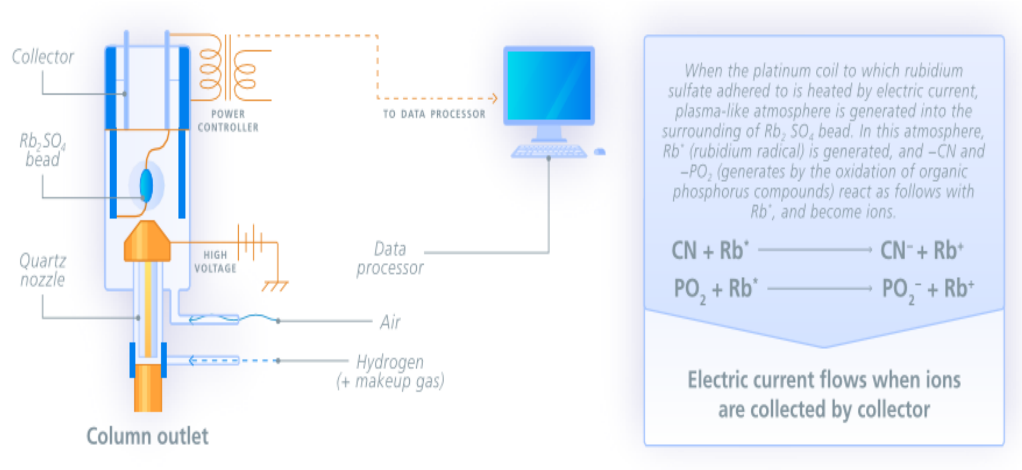


شکل ۴۹-۶) ساختار آشکارساز ECD

۶-۱-۴-۵-۴) آشکارساز نورسنجی شعله‌ای

آشکارساز FPD یک آشکارساز بسیار انتخابی و حساس است که به‌ویژه برای شناسایی ترکیبات آلی فسفره (P)، گوگرد (S) و قلع (Sn) به کار می‌رود. در این آشکارساز، با برقراری جریان الکتریسیته در المان حرارتی پلاتینیوم که روی آن سولفات روبیدیم (Rb) قرار دارد، پلاسمای سرد و رادیکال‌های Rb تولید می‌شود. این فرآیند باعث ایجاد جریان الکتریسیته از آند به کاتد سیستم با ولتاژ بالا می‌شود.

این آشکارساز برای آنالیز ترکیبات معدنی نیتروژنه مناسب نیست و قادر به شناسایی ترکیبات آمونیوم نمی‌باشد. کاربرد اصلی آشکارساز FPD در شناسایی آفت‌کش‌های نیتروژنه و فسفره، داروها، و به‌ویژه در آنالیز آفت‌کش‌های فسفره، ترکیبات گوگرددار و فلز قلع در نمونه‌های مواد غذایی، آب، خاک و هوا است.

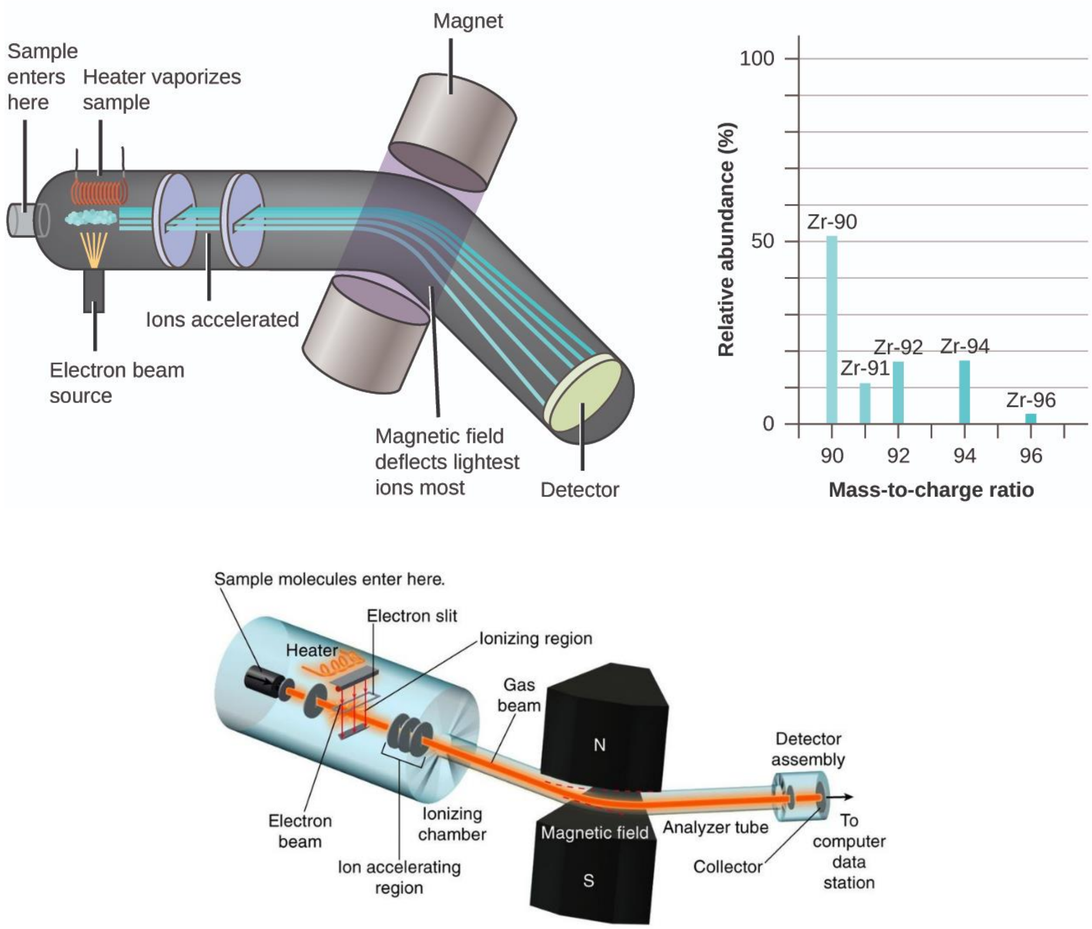


شکل ۵۰-۶) ساختار آشکارساز FPD

۶-۱-۴-۵-۵)   آشکارسازی طیف سنجی جرمی

Francis Aston در سال ۱۹۲۲ برای کاربرد این آشکارساز در علوم جایزه نوبل گرفت. آشکارساز MS مانند آشکارساز TD برای شناسایی کلیه ترکیبات می‌تواند استفاده شود و دارای ویژگی خاصی نسبت به تمام آشکارسازها از لحاظ تشخیص کیفی ترکیبات به کمک اثر انگشت ناشی از شکسته شدن ترکیب به چند بخش کوچکتر با یک یا دو یون مثبت می‌باشد. این آشکارساز دارای سه بخش منبع یون‌ساز، آنالیزور جرمی و آشکارساز یون‌های مثبت ناشی از شکسته شدن ترکیب اصلی می‌باشد. کاربرد این آشکارساز برای اندازه‌گیری کمّی و کیفی ترکیبات شیمیایی به‌ویژه ترکیبات مجهول می‌باشد.

در بخش اول از آشکارساز MS یک اختلاف پتانسیل ۷۰ eV ایجاد می‌شود که ستون الکترونی بین دو قطب مثبت و منفی الکترود را شکل می‌دهد. مولکول‌های واردشده از ستون کروماتوگرافی به آشکارساز، با این الکترون‌ها برخورد کرده و بلافاصله به چند بخش به‌صورت یون‌های مثبت شکسته می‌شوند. در بخش دوم از آشکارساز MS، ترکیبات یونی بر اساس نسبت جرم به بار یونی m/z در میدان مغناطیسی جداسازی می‌شوند.

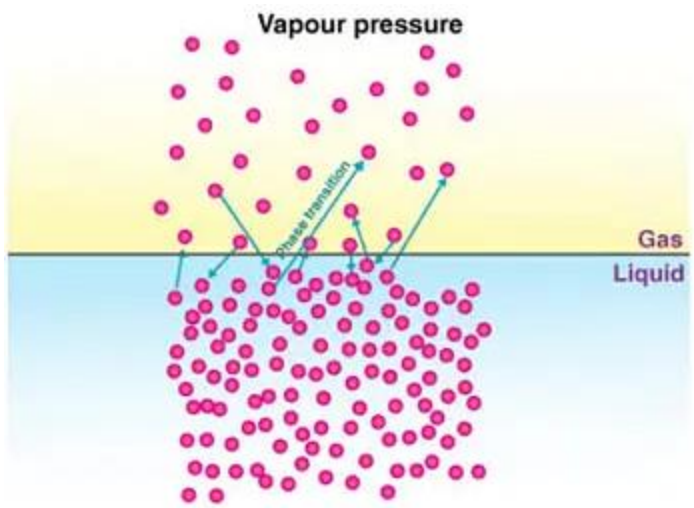


شکل ۵۱-۶) ساختار آشکارساز جرمی

ترکیبات شارژدار مثبت که در بخش دوم آشکارساز جداسازی شده‌اند، به قسمت‌های مختلف آشکارساز برخورد کرده و با گرفتن الکترون خنثی می‌شوند. این فرایند باعث برقراری مجدد جریان الکتریسیته می‌شود که پس از تقویت، سیگنال‌هایی برای جرم‌های مختلف در کسرهای m/z نشان داده می‌شوند. شناسایی ترکیبات یونیزه شده با بار مثبت به‌صورت اثر انگشت ترکیب جداسازی شده در سیستم GC است که برای تشخیص کمّی و کیفی ترکیب اصلی از طریق اطلاعات برنامه‌ریزی شده در سیستم کامپیوتر دستگاه، انجام می‌شود.

۶-۱-۴-۶) کاربرد سیستم کروماتوگرافی در رشته مهندسی بهداشت حرفه‌ای

در محیط‌های شغلی تعداد بسیار زیادی از ترکیبات شیمیایی آلی استفاده می‌شوند که با توجّه به ویژگی‌های خود دارای فشار بخارهای مختلفی هستند. فشار بخار نیرویی است که مایعات یا جامدات در شرف تغییر فاز به حالت گازی شکل بر سطح ظرف وارد می‌کنند. به عبارت دیگر، به دیوارهای یک ظرف یا سایر مرزهای محدودکننده یک ماده، فشار بخار وارد می‌شود. همه مایعات و جامدات تمایل به تبخیر و تبدیل به حالت گازی شکل دارند و همه گازها تمایل به متراکم شدن به حالت مایع یا جامد دارند. ترکیبات با افزایش حرارت دارای فشار بخار بیشتری خواهند شد. به‌طور کلی، فشار بخار در دمای متعارف محیط (۲۵ سانتی‌گراد) اندازه‌گیری می‌شود.



شکل ۵۲-۶) نمایش فشار بخار در یک دمای معین زیر نقطه جوش

فشار بخار در واقع مسئول تبخیر مایع و تبدیل آن به گاز و یا عامل تراکم گاز و تبدیل آن به مایع است. در این فرایند، کارکنان یک محیط شغلی می‌توانند ترکیبات آلی فرار را دریافت کرده و اثرات بالقوه مسمومیت را در این شرایط نشان دهند.

در محیط‌های شغلی تعداد بسیار زیادی از ترکیبات شیمیایی آلی استفاده می‌شوند که با توجّه به میزان فراریت ناشی از فشار بخار، در سه دسته طبقه‌بندی شده‌اند.

۱- ترکیبات فرار با فشار بخار بیشتر از ۱ میلی‌متر جیوه ($VP > 1\ mmHg$)

۲- ترکیبات نیمه فرار با فشار بخار بین ۱ تا میلی‌متر جیوه ($10^{-7} < VP < 1\ mmHg$)

۳- ترکیبات غیر فرار ($VP < 10^{-7}\ mmHg$)

بوهای شیمیایی موجود در محیط‌های شغلی بیانگر فراریت ترکیبات موجود در محیط‌های شغلی و مواجهه کارکنان مشاغل مختلف با گاز و بخارات ترکیبات آلی فرار است. اندازه‌گیری میزان تماس شغلی با ترکیبات فرار مستلزم آنالیز نمونه‌های جمع‌آوری شده، آماده‌سازی نمونه‌ها و آنالیز با دستگاه GC است. همان‌طور که در بخش اولیه این فصل ذکر گردید، سیستم آشکارساز معمول آنالیز دستگاهی GC شامل FID، ECD و یا در مواردی آشکارسازهای تخصصی FPD و یا MS است. در روش‌های استاندارد ارائه شده توسط سازمان‌های NIOSH و OSHA برای اندازه‌گیری ترکیبات آلی فرار، از دستگاه‌های آنالیزور کروماتوگرافی به‌صورت گاز و مایع استفاده شده است. در این بخش از کتاب، مطالب متمرکز بر تبخیر و یا تصعید ترکیبات شیمیایی در هوای محیط کار و مواجهه کارکنان با ترکیبات شیمیایی از طریق اندازه‌گیری با دستگاه GC است.

برای توجیه بهتر کاربرد سیستم GC در رشته مهندسی بهداشت حرفه‌ای، لازم دانستم تعدادی از پروژه‌های تحقیقاتی همکاران را در چند دهه اخیر که به‌صورت مقاله در ژورنال‌های ایندکس خارجی منتشر شده است، به‌طور اختصار برای کارشناسان محترم گزارش نمایم و سپس یکی از پرکاربردترین روش‌های کروماتوگرافی گازی را در مورد یک گروه از ترکیبات شیمیایی و اندازه‌گیری مواجهه کارکنان به‌طور مشروح ارائه دهم.

کاربرد سیستم کروماتوگرافی گازی در دو زمینه در رشته مهندسی بهداشت حرفه‌ای مطرح است:

۱- اندازه میزان مواجهه شغلی کارکنان

۲- پایش بیولوژیکی کارکنان در مواجهه شغلی با ترکیبات آلی فرار یا نیمه فرار

در فرایند آماده‌سازی نمونه‌های گرفته شده از محیط کار به روش ۱۵۰۱ سازمان NIOSH، نمونه‌ها در شرایط متعارف به‌صورت شیمیایی با حلال CS_2 برای تزریق به دستگاه GC آماده‌سازی می‌شوند. این روش معمول ضمن

آسانی، دو مشکل عمده دارد. نخست اینکه در این روش معمولاً فقط یک میکرولیتر از یک میلی‌لیتر نمونه آماده‌سازی شده به دستگاه تزریق می‌گردد که در برخی از موارد حساسیت لازم برای اندازه‌گیری‌ها را فراهم نمی‌کند. در مرتبه دوم، حلال یاد شده بسیار سمی می‌باشد و می‌تواند اثرات سلامتی برای پرسنل آزمایشگاه به دنبال داشته باشد. از این‌رو یکی از رویکردهای جدید آماده‌سازی نمونه‌ها، استخراج حرارتی یک یا دو مرحله‌ای است که در فصل ۵ توضیحات لازم در خصوص آن ارائه گردید. در رابطه با کار استخراج حرارتی، دو پروژه قابل ذکر موجود است. مورد نخست مقاله‌ای با موضوع استفاده از سیستم استخراج‌کننده حرارتی دو مرحله‌ای برای اندازه‌گیری پنتان هوای بازدم به‌عنوان بیومارکر تنش اکسیداتیو در کارگران در معرض مواجهه با اکسیدهای ازت می‌باشد و در مورد دوم، با توجّه به نبود این دستگاه‌ها، به طراحی و ساخت یک دستگاه استخراج‌کننده حرارتی یک مرحله‌ای اشاره شده است که منجر به ارتقاء حساسیت اندازه‌گیری‌ها گردید. این روش نهایتاً دست‌مایه کاربرد روش استخراج حرارتی در تعدادی از پروژه‌های دکتری دانشجویان گردید که به‌شرح زیر گزارش می‌شوند.

بسط و گسترش یک روش نمونه‌برداری جدید با استفاده از سوزن جاذب

Cyclophosfamide یک داروی درمانی برای بیماران سرطانی است که بعد از نمونه‌برداری از آن توسط سوزن جاذب (NTD)[1] می‌توان آن را مستقیماً به اینجکتور دستگاه GC تزریق نمود. مواد نمونه‌برداری شده در دمای زیاد تبخیر و به ستون برای آنالیز وارد می‌گردد. NTD در واقع یک نمونه از سیستم استخراج حرارتی است که در مطالعات دیگری نیز استفاده شده است. برای مثال، در مطالعه دیگری از سوزن جاذب پر شده از آئروژل سیلیکا برای نمونه‌برداری از آلدئیدهای فرار فرمالدئید و آکرولئین استفاده شد و عملکرد روش استاندارد سازمان NIOSH به شماره ۲۵۴۱ با آن مقایسه گردید. در این مطالعه سوزن پر شده از آئروژل سیلیکای نانومتخلخل (NPSA)[2] برای نمونه‌برداری و آنالیز ترکیبات فرمالدئید و آکرولئین از هوا معرفی شد. هر دو روش NTD-NPSA و ۲۵۴۱-NIOSH نشان دادند که از کارایی لازم برای آنالیز ترکیبات برخوردارند و می‌توانند برای نمونه‌برداری و تعیین

[1] Needle Trap Device

[2] nanoporous silica aerogel

غلظت آنالیت در هوا به‌کار برده شوند. با این حال، برخلاف روش NIOSH-۲۵۴۱، روش NTD یک تکنیک بدون کاربرد حلال است که در آن آنالیت مستقیماً به‌صورت حرارتی به داخل درگاه تزریق GC انجام می‌شود. همچنین برخلاف روش NIOSH-۲۵۴۱، NTD-NPSA را می‌توان بعد از پاکسازی در نمونه‌برداری بعدی استفاده کرد. بنابراین با توجّه به این نکته که NTD-NPSA به حلال شیمیایی برای آماده‌سازی نیاز ندارد و نیز قابلیت استفاده مجدد از روش، می‌توان گفت که هزینه نمونه‌برداری با این روش به‌مراتب کمتر از روش NIOSH-۲۵۴۱ خواهد بود. نتایج مطالعه تطبیقی روش‌های NIOSH-۲۵۴۱ و NTD-NPSA نشان داد که NTD در تعیین تراکم‌های بسیار پایین از نمونه، از کارایی بیشتری برخوردار است و در نتیجه دارای عملکرد بهتری است.

از مطالعات دیگر در زمینه استفاده از NTD در بهداشت حرفه‌ای می‌توان به نمونه‌برداری از بنزن هوای یکی از پالایشگاه‌های نفت کشورمان اشاره کرد. بنزن در اکثر فرایندهای مشتقات نفت و یا کاربرد حلال‌های شیمیایی و یا به‌صورت بخشی از سوخت خودروها حضور دارد و مواجهه شغلی با آن در بسیاری از فرایندهای کاری مشاهده می‌شود. سوزن جاذب ابداع‌شده توسط محققین در این مطالعه شامل یک سوزن با گیج ۲۱ و طول ۱۰ سانتی‌متر بود که توسط ۲ میلی‌گرم از مواد جاذب Carboxen-1000 برای جذب بنزن پر شد. نمونه‌برداری از هوای محیط انجام گردید و سپس با دستگاه GC-FID آنالیز گردید. دامنه طیف‌سنجی غلظت در محدوده خطی ppb ۲۵- ۲۵۰۰ بود. حد LOD و LOQ در این مطالعه به ترتیب ppb ۱۰ و ۲۰ گزارش شدند. تطابق استانداردهای اتمسفریک ساخته شده توسط این روش با داده‌های روش OSHA-۱۲ بر روی نمودار بلند-آلتمن مورد بررسی قرار گرفت. بر اساس این روش، توافق بین دو مجموعه داده‌ها دیده شد. در نمونه‌برداری‌های انجام شده توسط روش پیشرفته NTD در پالایشگاه و در شرایط عادی، غلظت بنزن در محدوده ppm ۰.۱۵ تا ۱.۲ اندازه‌گیری شدند. نتایج نشان داد که نمونه‌بردار NTD پر شده از carboxen-1000 یک روش قابل اعتماد و مؤثر و یک تکنیک حساس و قدرتمند برای نمونه‌برداری از بنزن در قیاس با روش روتین OSHA-۱۲ است.

از کاربردهای دیگر روش پیشرفته NTD می‌توان به پایش بیولوژیکی کارکنان از طریق اندازه‌گیری ترکیب سیکلوفسفامید در نمونه ادرار پرسنل بیمارستانی نام برد.

۶-۱-۴-۷) تشریح روش استاندارد آنالیز حلال شیمیایی برای آنالیز توسط دستگاه GC

روش‌های روتین سازمان OSHA (ID12) و NIOSH (۱۵۰۱) به‌طور معمول برای ارزشیابی مواجهه شغلی در چهار دهه گذشته از بیشترین کاربرد در آزمایشگاه‌های بهداشت حرفه‌ای برخوردار بوده است. برای مثال، هر آزمایشگاه خوب در سال حداقل دو یا سه هزار آنالیز را به روش ۱۵۰۱ سازمان NIOSH انجام می‌دهد. روش یاد شده حلال‌ها را در دو گروه به‌شرح زیر آنالیز می‌نماید:

Group A: benzene, toluene, ethylbenzene, o-xylene, m-xylene, p-xylene
Group B: cumene, p-tert-butyltoluene, α-methylstyrene, β-methylstyrene, styrene

روش NIOSH-۱۵۰۱ دارای برخی امتیازها و محدودیت‌ها است. از مزایای این روش این است که بسیار رایج بوده و امکانات آن در بیشتر آزمایشگاه‌های کشور موجود است، اما نکته منفی آن در کاربرد حلال دی‌سولفید کربن (CS2) برای استخراج شیمیایی و حساسیت نسبتاً کم آن برای آنالیز بنزن در قیاس با سایر روش‌های دارای استخراج حرارتی است. در روش ۱۵۰۱ که برای دو گروه از ترکیبات آلی فرار ارائه شده است، از نمونه‌بردار ذغال فعال استفاده می‌شود. نمونه‌برداری تا حداکثر حجم ۳۰ لیتر بر دقیقه و با گذر حجمی ۰.۲ دقیقه بر مترمکعب برای ترکیب بنزن انجام می‌شود. لازم به ذکر است که در روش سازمان NIOSH-۱۵۰۱، نمونه‌برداری برای سایر آنالیت‌ها با حجم نمونه‌برداری کمتری انجام می‌شود. نمونه‌های برداشته شده همان‌طور که بیان شد بعد از استخراج شیمیایی برای آنالیز به دستگاه GC-FID تزریق می‌شود. در طی سه دهه اخیر علاوه بر نمونه‌های ارسالی از طرف شرکت‌های مهندسی بهداشت حرفه‌ای، پروژه‌های متعددی نیز با استفاده از دو روش یاد شده آنالیز گردیده است که برخی از آنها به شرح زیر می‌باشند:

۱- پروژه پایش محیطی کودکان ۱۰ الی ۱۲ ساله جنوب تهران با ترکیب بنزن

۲- پروژه ارزیابی ریسک تماس شغلی کارکنان صنعت تایر در حومه تهران

۳- چالش‌های کنترل مواجهه شغلی کارکنان یک صنعت رنگ‌سازی در حومه شهر تهران

۴- امکان‌سنجی پایش بیولوژیکی کارکنان در مواجهه با بنزن و تولوئن از طریق اندازه‌گیری آنها در هوای بازدم

۵- پایش شغلی کارکنان صنعت پلاستیک با منومر وینیل کلراید و همچنین پایش بیولوژیکی کارکنان از طریق اندازه‌گیری آن در هوای بازدم

با توجّه به اهمیت روش ۱۵۰۱ سازمان NIOSH که به‌طور معمول برای حلال‌های آلی به‌کاربرده می‌شود، روش یاد شده در این بخش به‌طور اجمالی برای کارشناسان بازگو می‌گردد.

روش ۱۵۰۱ سازمان NIOSH

همان‌طور که بیان شد، روش ۱۵۰۱ برای دو دسته از حلال‌ها استفاده می‌شود و روش نمونه‌برداری فردی از کارکنان به‌شرح زیر می‌باشد:

➢ **نمونه‌برداری:**

۱-کاربرد نمونه‌بردار شیشه‌ای حاوی جاذب ذغال فعال SKC

۲- گذر حجمی و حداقل و حداکثر حجم نمونه‌برداری بر اساس ویژگی‌های ترکیبات مندرج در جدول ۱۵-۶ تنظیم گردد.

۳- نحوه انتقال نمونه‌ها به آزمایشگاه نیاز به شرایط ویژه‌ای ندارد، اما بهتر است در یخدان حمل شود.

۴-پایداری نمونه‌ها ۳۰ روز در دمای 5 °C

۵-تعداد نمونه‌های شاهد مورد نیاز برای آنالیز به تعداد حداقل ۱۰٪ از کل نمونه‌ها

➢ **تکنیک و روش آنالیز با استفاده دستگاه آنالیزور GC:**

۱- نام دستگاه آنالیز دستگاهی: GC با آشکارساز FID

۲-آنالیت‌های مورد نظر برای آنالیز ترکیبات حلال

Group A: benzene, toluene, ethylbenzene, o-xylene, m-xylene, p-xylene

Group B: cumene, p-tert-butyltoluene, α-methylstyrene, β-methylstyrene, styrene

➢ استخراج نمونه‌ها:

به روش شیمیایی و توسط ۱ میلی‌لیتر از حلال CS_2

➢ تنظیمات حرارتی در دستگاه گاز کروماتوگرافی:

دمای تزریق نمونه: ۲۵۰ °C

دمای آشکارساز: ۳۰۰ °C

دمای ستون کروماتوگرافی برای ترکیبات گروه A: ۴۰°C برای ده دقیقه و سپس افزایش حرارت با شیب ۱۰ درجه سانتی‌گراد در دقیقه تا سقف ۲۳۰ °C

دمای ستون کروماتوگرافی برای ترکیبات گروه B: ۳۵°C برای هشت دقیقه و سپس افزایش حرارت با شیب ۱۰ درجه سانتی‌گراد در دقیقه تا سقف ۲۲۵ °C

➢ گاز حامل:

گاز هلیوم با هواگذر ۲.۶ mL/min

➢ ستون کروماتوگرافی:

طول و مشخصات ستون برای دو گروه از آنالیت‌ها

گروه A	Fused Silica Open Tabular (FSOT): 30m × 0.32-mm ID; 1-µm film 100% Polyethylene Glycol (PEG)
گروه B	Capillary, fused silica 30m × 0.53-mm ID; 3-µm film 35% diphenyl 65% & dimethyl polysiloxane or equivalent

➢ محلول‌های استاندارد برای کالیبراسیون دستگاه:

محلول‌های استاندارد در حلال CS_2

دامنه غلظتی:

بر طبق مندرجات جدول ۱۶-۶

LOD تقریبی:

بر طبق مندرجات جدول ۱۶-۶

تکرار پذیری داده‌ها:

بر طبق مندرجات جدول ۱۶-۶

راستی آزمایی روش:

تورش دامنه غلظتی نمونه‌های مطالعه شده: بر طبق مندرجات جدول ۱۵-۶

تکرارپذیری کلی داده‌ها:

بر طبق مندرجات جدول ۱۵-۶

راستی یا صحت نمونه‌ها:

بر طبق مندرجات جدول ۱۵-۶

- **کاربرد روش:**

این روش برای تعیین حدود سقفی و TWA هیدروکربن‌های آروماتیک آورده شده است. اثرات متقابل بین آنالیت‌ها ممکن است حجم نمونه‌برداری را کاهش داده و راندمان استخراج نمونه‌ها را تحت تأثیر قرار دهد.

- **مداخله‌گرها:**

تحت شرایط رطوبت زیاد ممکن است حجم مورد نظر برای وقوع نقطه شکست کاهش یابد. ترکیبات آلی فرار از قبیل الکل‌ها، کتون‌ها، اترها و هیدروکربن‌های هالوژنه به‌عنوان مداخله‌گرهای آنالیز محسوب می‌شوند.

- **مواد شیمیایی لازم:**

۱-CS_2 خالص، مخصوص کارهای شیمیایی تجزیه

۲-سایر مواد شیمیایی برای ساخت استاندارد نیز می‌بایست از کیفیت عالی آزمایشگاهی برخوردار باشند.

۳- گاز هلیوم تصفیه و فیلتره شده (در شرایط نبود هلیوم می‌توان از گاز نیتروژن با ناخالصی در حداقل مقدار ممکن و فیلتره شده برای کروماتوگرافی استفاده نمود).

۴-هیدروژن تصفیه و فیلتر شده

۵-هوا تصفیه و فیلتر شده

- **دستگاه و وسایل مورد نیاز:**

۱- نمونه‌بردار از جنس شیشه‌ای به طول ۷ سانتی‌متر و قطر خارجی ۶ میلی‌متر و قطر داخلی ۴ میلی‌متر. دو سر لوله نمونه‌بردار می‌بایست بسته باشد و حاوی ذغال فعال تهیّه شده از پوست نارگیل در مقادیر ۱۰۰ میلی‌گرم و ۵۰ میلی‌گرم به ترتیب در دو بخش جلویی و عقبی و دو میلی‌متر فوم اورتان برای جداسازی این دو بخش باشد.

۲-GC-FID و ستون کروماتوگرافی طبق مشخصات صفحه قبل به انضمام کامپیوتر.

۳-در صورت امکان استفاده از بازوهای رباتیک تزریق خودکار و ویال‌هایی به حجم ۱.۸ mL دارای درپوشی از جنس PTFE

۴- میکروسرنگ‌های ۱۰، ۲۵ و ۲۵۰ µL

۵-بالن ژوژه‌هایی به حجم ۱۰mL

- **احتیاطات لازم برای کار با حلال CS_2:**

حلال CS2 بسیار سمی است و بشدت محترقه (flash point=-30°C) و بنزن ترکیب سرطانزای انسانیA1 است. محلول‌های استاندارد می‌بایست زیر هود آزمایشگاه با میزان تهویه طبق استاندارد تهیّه گردد.

- **نمونه‌برداری:**

۱-گذر حجمب پمپ نمونه‌برداری فردی می‌بایست کالیبره شود.

۲-دو سر لوله‌های جاذب درست قبل از نمونه‌برداری شکسته شوند. لوله‌های نمونه‌بردار با لوله قابل ارتجاع به پمپ متصل شوند.

۳-نمونه‌برداری در گذر حجمی مناسب و به‌طور دقیق برای جمع‌اوری حجم کل نمونه‌برداری (بر اساس مندرجات جدول ۱۵-۶) انجام می‌شود.

۴-دو سر نمونه‌بردار بعد از خاتمه نمونه‌برداری با در پوش‌های پلاستیکی (نه لاستیکی) برای حمل به آزمایشگاه بسته می‌شوند.

۵-قسمت‌های جاذب جلو و عقب لوله سمپلر را در ویال‌های جداگانه قرار دهید. فوم پلی‌اورتان جداکننده نیز باید به ویال قسمت جلویی افزوده گردد.

۶-به هر ویال ۱ میلی‌لیتر از حلال CS_2 اضافه کنید. سرپوش را بلافاصله به هر ویال وصل کنید و آنها را مهر و موم نمایید.

۷-به هر نمونه، حداقل ۳۰ دقیقه زمان بدهید و در این فاصله مکرراً ویال‌ها را تکان دهید.

- **کالیبراسیون و کنترل کیفیت:**

۸-منحنی کالیبراسیون را به صورت روزانه و با حداقل شش استاندارد کاری تهیّه شده در غلظت‌های کمتر از LOD تا ۱۰ برابر LOQ ترسیم کنید. در صورت لزوم، استانداردهای اضافی ممکن است برای گسترش منحنی کالیبراسیون اضافه شود.

الف) مقادیر مشخصی از آنالیت‌ها را به حلال CS_2 در بالن ژوژه‌هایی به حجم ۱۰ میلی‌لیتر اضافه کرده و رقیق کنید. در صورت لزوم محلول‌های استاندارد اضافی را از طریق رقیق‌سازی سایر استانداردها تهیّه کنید.

ب) نمونه‌های مورد و نمونه‌های کنترل یا شاهد را همراه هم آنالیز کنید (مرحله ۱۱ تا ۱۲).

ج) نمودار کالیبراسیون (مساحت پیک آنالیت و میزان جرمی میکروگرم آنالیت بر هر نمونه) را تهیّه کنید.

۹-راندمان استخراج نمونه‌ها از ذغال فعال را حداقل یک بار برای هر جعبه از نمونه‌های ذغال فعال در محدوده کالیبراسیون، اندازه‌گیری نمایید. (مرحله ۸).

الف) سه لوله نمونه‌بردار برای هر ۵ سطح غلظت استاندارد به اضافه ۳ نمونه شاهد آماده کنید.

ب) مقدار مشخصی از محلول استاندارد (۵ تا ۲۵ میکرولیتر) را با یک سرنگ میکرولیتری مستقیماً به بخش جلویی لوله‌های ذغال فعال تزریق کنید.

ج) اجازه دهید لوله‌ها برای چند دقیقه در هوا متعادل شوند، سپس انتهای هر لوله را درپوش بگذارید و یک شب نگهداری کنید.

د) استخراج شیمیایی لوله‌های نمونه‌بردار (مرحله ۵ تا ۷) و آنالیز نمونه‌ها همراه با استانداردها و نمونه‌های شاهد (مرحله ۱۱ و ۱۲) را انجام دهید.

ه) نموداری از راندمان استخراج با دو پارامتر میکروگرم از آنالیت و میزان بازیابی شده، تهیّه کنید.

۱۰-حداقل سه نمونه کنترل کیفی به‌صورت نمونه‌های افزوده شده کور از سه کارشناس آزمایشگاه برای راستی‌آزمایی گراف استخراج شیمیایی را تهیّه کنید.

- مرحله اندازه‌گیری:

۱۱-دستگاه GC را برای اساس توصیه‌های سازنده دستگاه و صفحه اول روش ۱۵۰۱ تنظیم نمایید. سپس یک میکرولیتر از نمونه‌ها را به‌طور دستی یا با سیستم اتوماتیک به درگاه ورود GC تزریق نمایید. در صورتی که اندازه پیک‌های ایجاد شده توسط ترکیبات بیشتر از استانداردهای آماده‌سازی باشد، نمونه را با حلال رقیق‌سازی نموده و میزان رقّت لحاظ شده (فاکتور رقّت) را در محاسبات اندازه‌گیری در نظر بگیرید. زمان ماندگاری ترکیبات در ستون کروماتوگرافی در شرایط خاص کاربرد ستون‌های موئینه ذکر شده و آنالیز ترکیبات طبق روش ۱۵۰۱ به‌شرح زیر می‌باشند:

آنالیت	زمان ماندگاری آنالیت بر حسب دقیقه در ستون‌های اعلام شده
Benzene a	۳.۵۲
Toluebea	۶.۱۳
Ethylbenzenea	۱۰.۶۵
o-xylenea	۱۲.۹۲
m-xylenenea	۱۱.۳۳
p-axylenea	۱۱.۴
cumeneb	۱۸.۶۱
p-tert-butyltolueneb	۲۱.۴۵
alpha -methylstyreneb	۱۹.۹۹

beta -methylstyreneb	۲۰.۸۲
styreneb	۱۸.۳۳

αکاربرد ستون موئینه 30-m Stabilwax fused silica

β کاربرد ستون موئینه 30-m Rtx-35 fused silica

۱۲-مساحت زیر پیک ترکیبات را برای محاسبه غلظت آنالیت‌های مختلف محاسبه نمایید.

- **محاسبات روش:**

۱۳. جرم نمونه جمع‌آوری شده بر حسب میکروگرم و بر اساس تصحیح راندمان استخراج آنالیت موجود در نمونه جلویی (Wf) و عقبی (Wb) و جرم نمونه کنترل موجود در نمونه جلویی (Bf) و عقبی (Bb) را محاسبه نمایید.

توجّه: اگر Wb>Wf/10 باشد، شکست جذب سطحی اتفاق افتاده است و باید از دست دادن نمونه احتمالی گزارش شود.

۱۴. غلظت آنالیت‌ها را در حجم هوای نمونه‌برداری شده بر حسب لیتر با استفاده از فرمول زیر محاسبه نمایید:

$$C = \frac{(W_f + W_b - B_f - B_b)}{V}, mg / m^3$$

یادآوری : $\mu g/L = mg/m^3$

جدول ۱۴-۶) مترادف‌ها، فرمول، وزن مولکولی و ویژگی‌های برخی ترکیبات آلی قابل آنالیز با GC

Name/Synonyms	Empirical Formula	Molecular Weight	Boiling Point (°C)	Vapor Pressure @ 25 °C (mm Hg)	(kPa)	Density @ 20 °C (g/mL)
benzene CAS #71-43-2 RTECS CY1400000	C_6H_6	78.11	80.1	95.2	12.7	0.879
p-tert-butyltoluene CAS #98-51-1 RTECS XS8400000 1-tert-butyl-4-methylbenzene	$C_{11}H_{16}$	148.25	192.8	0.7	0.09	0.861
cumene CAS #98-82-8 RTECS GR8575000 isopropylbenzene	C_9H_{12}	120.20	152.4	4.7	0.63	0.862
ethylbenzene CAS #100-41-4 RTECS DA0700000	C_8H_{10}	106.17	136.2	9.6	1.28	0.867
α-methylstyrene CAS #98-83-9 RTECS WL5075300 isopropenylbenzene (1-methylethenyl)-benzene	C_9H_{10}	118.18	165.4	2.5	0.33	0.909
β-methylstyrene CAS #873-66-5 RTECS DA8400500	C_9H_{10}	118.18	175.0	—	—	0.911
toluene CAS #108-88-3 RTECS XS5250000 methylbenzene	C_7H_8	92.14	110.6	28.4	3.79	0.867
xylene[f] CAS #1330-20-7 RTECS ZE2100000 dimethylbenzene (p-xylene)	C_8H_{10} (ortho) (meta) (para)	106.17	 144.4 139.1 138.4	 6.7 8.4 8.8	 0.89 1.12 1.18	 0.880 0.864 0.861
styrene CAS #100-42-5 RTECS WL3675000 vinylbenzene	C_8H_8	104.15	145.2	6.1	0.81	0.906

جدول ۱۵-۶) حد مجاز تماس شغلی

		NIOSH			ACGIH		
Substance	OSHA TWA	TWA	C	STEL	TLV	STEL	mg/m^3 per ppm
benzene	1	0.1[a]	1		10[b]		3.19
p-tert-butyltoluene	10	10		20	1		6.06
cumene	50 (skin)	50 (skin)			50 (skin)		4.91
ethylbenzene	100	100		125	100	125	4.34
α-methylstyrene	100	50		100	50	100	4.83
β-methylstyrene	100	50		100	50	100	4.83
toluene	200	100		150	50 (skin)		3.77
o-xylene	100	100[c]		150	100	150	4.34
m-xylene	100	100			100	150	4.34
p-xylene	100	100			100	150	4.34
styrene	100	50		100	50	100 (skin)	4.26

[a] Potential carcinogen
[b] Suspect carcinogen
[c] Group I Pesticide

جدول ۱۶-۶) گذر حجمی و ظرفیت حجمی نمونه‌برداری، شکست جذب سطحی، تورش، تکرارپذیری و درستی اندازه‌گیری‌ها به‌صورت میانگین

	Sampling			Breakthrough Volume @ Concentration		Range at VOL-MIN	Overall		
Substance	Flowrate (L/min)	Volume[b] (L) MIN	MAX	(L)	(mg/m^3)	(mg/m^3)	Bias (%)	Precision ($\hat{S}_{rT}$)	**Accuracy** (±%)
benzene	≤0.20	5	30	>45	149	42 - 165	-0.4	0.059	11.4
p-tert-butyltoluene	≤0.20	1	29	44	112	29 - 119	-10.3	0.071[c]	20.7
cumene	≤0.20	1	30	>45	480	120 - 480	5.6	0.059	15.2
ethylbenzene	≤0.20	1	24	35	917	222 - 884	-7.6	0.089[c]	17.1
α-methylstyrene	≤0.20	1	30	>45	940	236 - 943	-7.6	0.061[c]	16.9
β-methylstyrene	≤0.20	1	30	>45	940	236 - 943	-7.6	0.061	16.9
toluene	≤0.20	1	8	12	2294	548 - 2190	1.6	0.052	10.9
xylene (o-,m-,p-)	≤0.20	2	23	35	870	218 - 870	-1.2	0.060	12.2
styrene	≤1.00	1	14	21	1710	426 - 1710	-7.9	0.058[c]	16.7

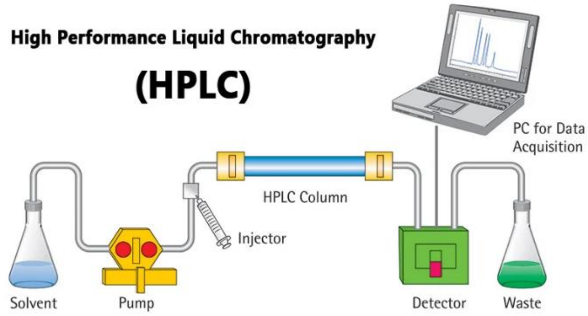
[a] Minimum recommended flow is 0.01 L/min.
[b] V_{Min} = minimum sample volume @ OSHA TWA;
V_{Max} = maximum sample volume @ OSHA TWA
[c] Corrected value, calculated from data in Reference 5.

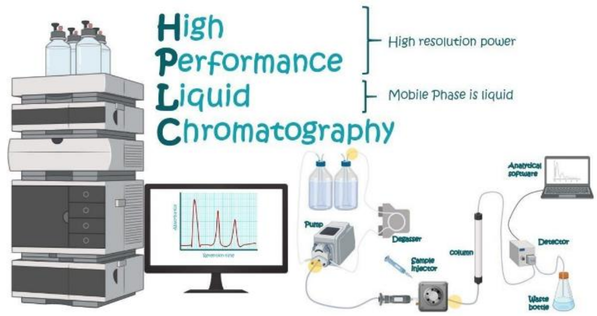
جدول ۱۷-۶) محدوده اندازه‌گیری‌ها و تکرارپذیری آنها

Substance	LOD (μg/sample)	Measurement Range (mg)	Measurement Precision ($\hat{S}_r$)
benzene	0.5	0.004-0.35	0.013
p-tert-butyltoluene	1.1	0.013-1.09	0.017[a]
cumene	0.6	0.039-3.46	0.017
ethylbenzene	0.5	0.045-8.67	0.015
α-methylstyrene	0.6	0.036-3.57	0.014
β-methylstyrene	0.6	0.036-0.728	0.014
toluene	0.7	0.024-4.51	0.022
o-xylene	0.8	0.044-10.4	0.014
m-xylene	0.8	0.043-0.864	0.013
p-xylene	0.7	0.043-0.861	0.015
styrene	0.4	0.181-8.49	0.014

به‌منظور توجیه اهمیت روش‌های آنالیز دستگاهی، لینک زیر برای شناسایی روش‌های نمونه‌برداری و آنالیز توسط کارشناسان محترم ارائه می‌شود. لازم به یادآوری است که عمدتاً ترکیبات آلی توسط دستگاه GC اندازه‌گیری می‌شوند، اما در برخی از موارد می‌توان از روش آنالیز دستگاهی HPLC برای تعیین تعدادی از ترکیبات آلی فرار استفاده نمود که فهرستی از اسامی این ترکیبات در لینک زیر قابل مشاهده است.

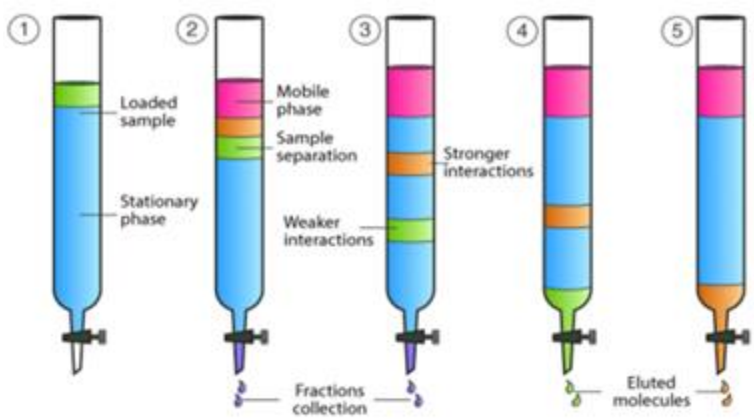
https://yiqi-oss.oss-cn-hangzhou.aliyuncs.com/aliyun/900101420/solution/213549.pdf





۶-۱-۵)   کروماتوگرافی مایع

کروماتوگرافی مایع یک روش ستونی ساده برای جداسازی یک ترکیب شیمیایی از مجموعه ترکیبات مخلوط یا محلول در یک سیال است. این تکنیک می‌تواند در مقیاس کوچک یا بزرگ برای تخلیص مواد نیز استفاده شود. کروماتوگرافی ستونی دارای دو فاز ثابت و متحرک است. (شکل ۵۳-۶).



شکل ۵۳-۶) ستون ساده کروماتوگرافی مایع و نمایش حرکت ترکیبات وارد شده در زمان‌های مختلف

همان‌طور که در شکل ۵۳-۶ دیده می‌شود، ترکیبات مختلط ورودی به ستون کروماتوگرافی، به‌لحاظ ساختار شیمیایی و تمایل پیوستی متفاوت با اجزای ستون به‌تدریج از یکدیگر جداسازی می‌شوند و به ترتیب از ستون خارج می‌شوند. به‌طور کلی در سیستم کروماتوگرافی مایع، نمونه به همراه فاز متحرک از بالای ستون وارد می‌شود و در طول حرکت فاز متحرک، اجزای نمونه که مخلوطی از چند ترکیب است با سرعت‌های متفاوت و بر اساس

نیروی ثقل و یا جذب ترکیبات بر روی فاز ثابت به‌صورت موقّت جداسازی شده و به این ترتیب خروج ترکیبات با سرعت‌های مختلف از ستون اتفاق می‌افتد. همان‌طور که گفته شد، ترکیبات موجود در نمونه بر اساس میزان تمایل جذبی به فاز ثابت در طول ستون حرکت می‌کنند. هرچه تمایل جذبی ترکیبات به فاز ثابت کمتر باشد، خروج آن‌ها از ستون سریع‌تر صورت می‌گیرد. یک فاز ثابت با شرایط ایده‌آل باعث می‌شود تا ترکیبات بر اساس میزان تمایل جذبی خود به آن، جداسازی شده و سپس در شرایط خاص یک به یک همراه فاز متحرک از ستون خارج شوند.

اجزای سازنده ساختار کروماتوگرافی مایع به شرح زیر می‌باشند:

فاز متحرک: حلال‌های ترکیبات شیمیایی مورد نظر برای جداسازی در درون خود تشکیل شده‌اند که بر اساس میزان تمایل جذبی ترکیبات شیمیایی به آن‌ها، اقدام به جداسازی آن‌ها از یکدیگر می‌کنند. اتانول، استون، آب، اسید استیک، پیریدین و ...، چند نمونه از حلال‌های قطبی هستند که به عنوان فاز متحرک استفاده می‌شوند.

فاز ثابت: ماده جامدی است که درون ستون را می‌پوشاند و باید قابلیت جذب مناسب را برای ترکیبات شیمیایی مورد نظر داشته باشد. جداسازی ترکیبات در ستون بر اساس تمایل جذبی ترکیبات به فاز ثابت انجام می‌شود. به‌طور کلی، فاز ثابت بایستی دارای خصوصیات زیر باشد:

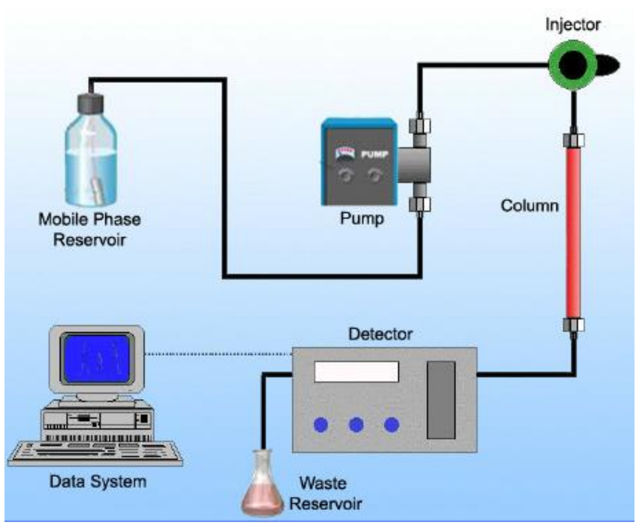
۱- ذرات فاز ثابت پر شده در ستون کروماتوگرافی باید در برابر اسیدها و بازها بی‌اثر باشند.

۲- ۲- ذرات تشکیل‌دهنده فاز ثابت در کروماتوگرافی مایع باید دارای شکل و اندازه یکنواخت بوده و قطر آنها ترجیحاً در محدوده ۶۰ تا ۲۰۰ میکرومتر باشد. البته این ابعاد در مورد کروماتوگرافی مایع با کارایی بالا (HPLC) تا ۳ الی ۵ میکرومتر کاهش می‌یابد.

۶-۱-۵-۱) دستگاه کروماتوگرافی مایع با کارایی بالا

دستگاه کروماتوگرافی مایع با کارایی بالا (HPLC)[1] نوع پیشرفته‌ای از دستگاه آنالیزور کروماتوگرافی مایع است.

دستگاه‌های آنالیزور HPLC از یک سیستم مدرن کروماتوگرافی مجهز به پمپ‌های قوی تشکیل شده‌اند که نیروی محرکه لازم برای پیش راندن نمونه محلول در فاز متحرک را در ستون‌های پر شده با فاز ثابت فراهم می‌کنند. نیروی وارده از این پمپ‌ها می‌تواند ترکیبات محلول در نمونه را با راندمان مطلوب جداسازی نماید. دستگاه‌های HPLC با آشکارسازهای مختلف در آزمایشگاه‌های تشخیص طبی، مواد غذایی، سم‌شناسی و آنالیز نمونه‌های آب، هوا و نمونه‌های بیولوژیکی به کار برده می‌شوند. دستگاه HPLC همانند سایر سیستم‌های کروماتوگرافی دارای دو فاز متحرک و ساکن است. ترکیبات شیمیایی موجود در نمونه مورد نظر برای آنالیز در فاز متحرک در طول ستون حرکت می‌کنند و پس از جداسازی، توسط آشکارساز شناسایی می‌شوند. در نهایت نتایج به‌دست آمده برای تشخیص کمّی و کیفی ترکیبات شیمیایی استفاده می‌شود (شکل ۵۴-۶).



شکل ۵۴-۶) نمای گرافیکی ساده از دستگاه HPLC

[1] High Performance Liquid Chromatography

۶-۱-۵-۲) اجزای دستگاه HPLC

اجزای سازنده دستگاه HPLC عبارتند از:

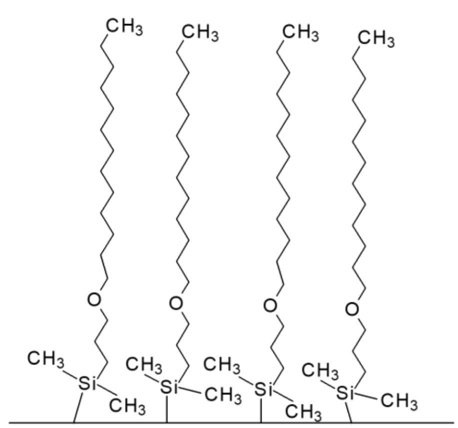
۱- **ستون**
۲- **ستون محافظ**
۳- **پمپ**
۴- **محل تزریق نمونه**
۵- **ترموستات**
۶- **آشکارساز**
۷- **سیستم پردازش داده**

۶-۱-۵-۲-۱) ستون دستگاه HPLC

قلب دستگاه HPLC ستونی است که در آن جداسازی ترکیبات از یکدیگر انجام می‌شود. ستون جداسازی از جنس لوله استیل ضد زنگ است که با ذرات ریزی از جنس ترکیبات پلی‌سیلوکسان پر شده است. ترکیبات پلی‌سیلوکسان دارای ساختار شیمیایی Si-O-Si هستند که پایداری شیمیایی و مقاومت حرارتی مطلوبی دارند.

ساختار شیمیایی گوی‌های ریز در ستون‌ها با توجّه به نوع کروماتوگرافی از ترکیبات پوششی مختلفی تشکیل شده است. ذرات پرکننده ستون دارای قطر ۳ تا ۵ میکرون هستند و بسته به نوع کروماتوگرافی و قطبیت آنالیت‌های مورد نظر، توسط ترکیبات خاصی پوشش‌دهی می‌شوند (شکل ۵۵-۶).

C-2	Ethyl Silyl	$-Si-CH_2-CH_3$
C-8	Octyl Silyl	$-Si-(CH_2)_7-CH_3$
C-18	Octadecyl Silyl	$-Si-(CH_2)_{17}-CH_3$
CN	Cyanopropyl Silyl	$-Si-(CH_2)_3-C$



شکل ۵۵-۶) فاز ثابت ستون‌های HPLC پوشیده شده از ترکیبات مختلف پلی‌سیلوکسان

اقسام مختلفی از دستگاه‌های HPLC در آزمایشگاه‌های شیمیایی استفاده می‌شوند. پرکاربردترین نوع آن‌ها در آزمایشگاه‌های آلودگی هوا، سیستم فاز معکوس-فاز یونی است. همچنین، دو سیستم دیگر شامل فاز نرمال و فاز جداسازی اندازه مولکولی نیز در دستگاه‌های HPLC مورد استفاده قرار می‌گیرند.

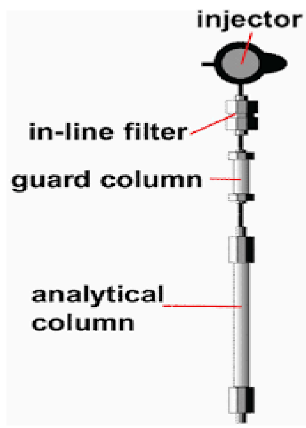
از آنجایی که فاز ثابت از ذرات متخلخل در ابعاد میکرونی تشکیل شده است، به پمپی نیاز است که قادر به اعمال فشار زیاد برای پیش‌رانش فاز متحرک حاوی نمونه در ستون باشد. فرآیند کروماتوگرافی با تزریق آنالیت مورد نظر برای تجزیه به سیستم آغاز می‌شود. جداسازی آنالیت حاوی ترکیبات در فاز متحرک هنگام حرکت در ستون، تحت تأثیر فشار ایجاد شده توسط پمپ انجام می‌شود. فاز متحرک از یک یا چند محلول مختلف از جمله آب دو بار تقطیر شده و دیونیزه شده، بافرهای فسفات، حلال‌های آلی قطبی (مانند متانول، دی‌کلرو متان و ...) و یا حلال‌های آلی مانند هگزان تشکیل می‌شود. انتخاب نوع فاز متحرک بستگی به آنالیت مورد نظر و حلالیت آن در آب یا دیگر حلال‌های آلی دارد.

به‌طور کلی، فاز متحرک در بطری‌های شیشه‌ای با درپوش‌های مخصوص ریخته می‌شود که از طریق لوله تفلون مجهز به فیلتر به ورودی پمپ متصل می‌گردد. قبل از استفاده، فاز متحرک می‌بایست فیلتر شده و با گاز هلیوم حباب‌زدایی شود. برای پیشگیری از ایجاد حباب‌های میکروسکوپی هوا در لوله‌های تفلون در حین جریان ثابت فاز متحرک ایجاد شده توسط پمپ، از گاز هلیوم استفاده می‌شود. ورود گاز هلیوم به مایعات فاز متحرک باعث خروج حباب‌های کوچک هوا می‌شود و بدین ترتیب فاز متحرک حباب‌زدایی می‌گردد.

در شرایط ایده‌آل، ترکیبات پس از جداسازی در فاز ثابت، به‌طور مجزا توسط فاز متحرک از ستون خارج می‌شوند و در یکی از سیستم‌های آشکارساز به‌صورت پیک‌های مجزا در نمایشگر سیستم کامپیوتر دستگاه نشان داده می‌شوند. پاسخ آشکارساز به صورت پیک‌هایی بر روی یک نمودار یا صفحه کامپیوتر نمایش داده می‌شود که به نام کروماتوگرام شناخته می‌شود. برای ثبت و تجزیه و تحلیل داده‌های کروماتوگرافی، از یک سیستم رایانه‌ای مجهز به نرم‌افزار خاص برای پردازش داده‌ها استفاده می‌شود.

۶-۱-۵-۲-۲) ستون محافظ

ستون‌های محافظ[1] دارای مشخصاتی شبیه به ستون‌های اصلی هستند امّا ذرات پر کننده آن، درشت‌تر بوده و طول ستون کوتاه‌تر است. این ستون‌های محافظ، همان‌طور که از نامشان پیداست، نقشی در فرایند کروماتوگرافی ندارند و تنها برای حذف ناخالصی‌های احتمالی از حلال‌ها و آنالیت پیش از ورود به ستون اصلی استفاده می‌شوند. به عبارت دیگر، ستون محافظ برای پیش‌تخلیص‌سازی آنالیت تزریقی و افزایش طول عمر ستون اصلی به کار می‌رود (شکل ۵۶-۶).



شکل ۵۶-۶) ستون محافظ تعبیه شده قبل از ستون اصلی



شکل ۵۷-۶) ستون HPLC و سطح مقطع آن

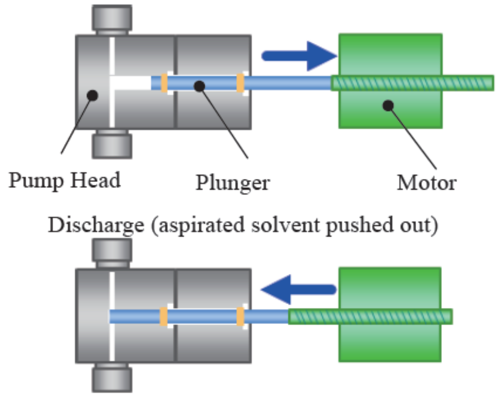
[1] Guard Column

۶-۱-۵-۳) پمپ سیستم HPLC

پمپ‌های مولد فشار زیاد برای راندن نمونه در طول بسترهای فاز ثابت مورد نیاز هستند. عبور فاز متحرک حاوی نمونه از میان ذرات ریز تشکیل‌دهنده بستر فاز ثابت (که در دستگاه HPLC معمولاً حدود ۳ میکرومتر است) به نیروی محرکه زیادی نیاز دارند. کوچکتر شدن ابعاد ذرات تشکیل‌دهنده فاز ثابت مزایای زیادی در پی دارد، اما ممکن است برای کلیه جداسازی‌ها ضروری نباشد. مهم‌ترین مزیت بسترهای فاز ثابت، ایجاد جداسازی بهتر و سریع‌تر و افزایش ظرفیت بار نمونه است. با این حال، تنها برخی از آنالیت‌ها به این روش جداسازی پیشرفته نیاز دارند. در بسیاری از موارد، جداسازی را می‌توان با ذرات بزرگتر (حدود ۵ میکرومتر) انجام داد که نیاز به اعمال فشار کمتری از سوی پمپ‌ها برای حرکت فاز متحرک دارند.

پمپ‌های مدرن دستگاه HPLC دارای مشخصاتی به شرح زیر هستند:

- همانطوری‌که در شکل ۵۷-۶ دیده می‌شود پمپ‌های پیستونی در سیستم آنالیز دستگاهی HPLC توان تولید حداکثر فشاری معادل ۶۰ MPa را برای ستون‌های پر شده از دانه‌هایی با ابعاد ۳ µm دارند که قادر به ایجاد سرعت خطی در دامنه ۰.۰۱ تا ۱۰ میلی‌لیتر در دقیقه هستند.
- دارای قابلیت ثبات گذر حجمی و با حداکثر تغییرات ۱٪ هستند.
- برای جداسازی ترکیبات بر اساس اندازه مولکول که یکی از انواع کروماتوگرافی می‌باشد، (Size Exclusion Chromatography)، گذر حجمی فاز متحرک می‌بایست ثابت و بین ۱ ml/min تا ۰.۶ باشد.
- تأمین فشار تا حداکثر ۶۰ MPa برای ستون معمولی HPLC (دانه‌بندی ۳ µm) و ۱۰۰ MPa برای ستون‌های با دانه‌بندی ۲ µm امکان‌پذیر است.



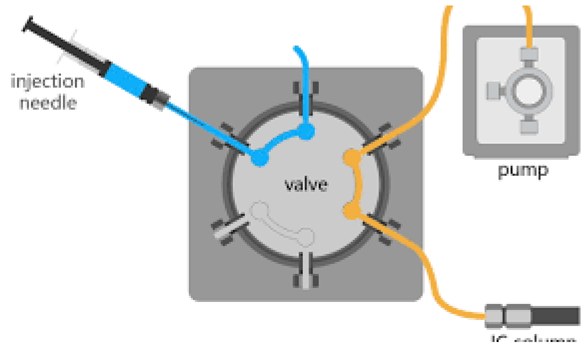
شکل ۵۸-۶) پمپ رفت و برگشتی

۶-۱-۵-۴) محل تزریق سیستم HPLC

محل تزریق دستگاه HPLC باید به گونه‌ای طراحی شده باشد که امکان تزریق نمونه مایع را در دامنه حجمی ۰.۱ تا ۱۰۰ میکرولیتر و با قابلیت تکرارپذیری استاندارد و فشار ۶۰ MPa فراهم کند. تزریق نمونه به سیستم را می‌توان به روش‌های مختلفی انجام داد. شیر تزریق یکی از روش‌های تنظیم تزریق به دستگاه است که در اکثر موارد جایگزین درگاه تزریق با سرنگ شده است. تزریق با استفاده از شیر قابل تنظیم، امکان تزریق سریع، قابل تکرار و مستقل از شیوه کار اپراتور را در حجم‌های مختلف نمونه فراهم می‌کند. شیر تنظیمی در واقع یک لوپ[1] یا همان پیمانه متصل به شیری از جنس فولاد ضد زنگ هست که شامل یک سیستم شش شاخه[2] است. لوپ‌ها در حجم‌های مختلف وجود دارند و از قابلیت نصب بر روی دستگاه پیش از تزریق نمونه برخوردارند. لوپ‌ها تعیین‌کننده حجم خاصی از نمونه هستند که باید به دستگاه تزریق شود. به این ترتیب که با چرخش شیر تنظیمی در جهت عقربه‌های ساعت، لوپ از نمونه پر می‌شود و همراه با جریان فاز متحرک به طرف ستون هدایت می‌گردد. این سیستم تزریق را می‌توان به‌صورت دستی یا از طریق سیستم‌های تزریق‌کننده که توسط کامپیوتر کنترل می‌شود، به‌طور خودکار انجام داد.

[1] Loop

[2] Rheodyne



شکل ۵۹-۶) طرح شماتیک لوپ در درگاه تزریق نمونه

۶-۱-۵-۵)   ترموستات‌ها

از ترموستات غالباً برای دستگاه‌های HPLC با ستون‌های تبادل یونی[۱] و یا جداکننده‌های اندازه ترکیبات (SEC)[۲] استفاده می‌شود در حالی‌که سیستم فاز معکوس[۳] برای دماهای بالاتر از دمای اتاق و به منظور کنترل دقیق دمای ستون به‌کار برده می‌شود. کاربرد ترموستات برای ستون به‌عنوان یک ویژگی مطلوب در دستگاه‌های HPLC مدرن تلقی می‌شوند. تغییرات دما در ستون HPLC به‌طور کلی باید در دامنه ۰.۲± درجه نگهداشته شود. حفظ دمای ثابت برای ستون‌ها، به‌ویژه در تجزیه و تحلیل کمّی، اهمیت زیادی دارد؛ زیرا تغییرات دما می‌تواند به‌طور جدی بر اندازه پیک نشان‌دهنده غلظت نمونه تأثیر بگذارد.

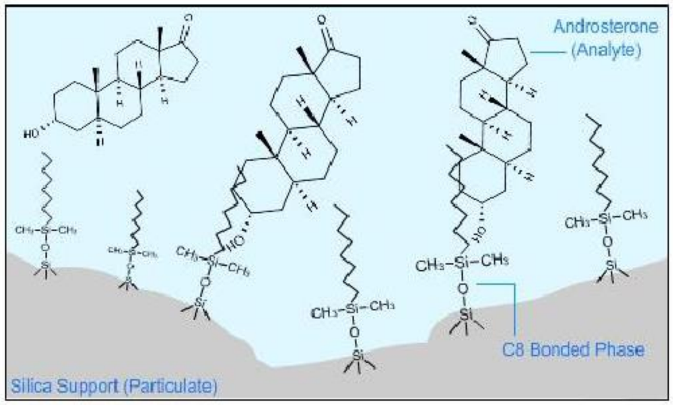
۶-۱-۵-۶)   تکنیک‌های جداسازی در دستگاه HPLC

۶-۱-۵-۶-۱)   جداسازی ترکیبات به شیوه فاز معکوس

سیستم فاز معکوس دارای یک فاز متحرک قطبی (مانند هگزان) و یک فاز ثابت غیر قطبی است. نام فاز معکوس از فاز اولیه سیستم کروماتوگرافی در دوران اولیه کار با دستگاه گرفته شده است. فازهای ثابت در جداسازی

[1] Ion Exchange
[2] Size exclusion chromatography
[3] Reverse phase

ترکیبات به شیوه فاز معکوس از جنس ترکیبات آبگریز هستند و از نظر شیمیایی به سطح ذرات ریز پرکننده ستون پیوند داده شده‌اند.



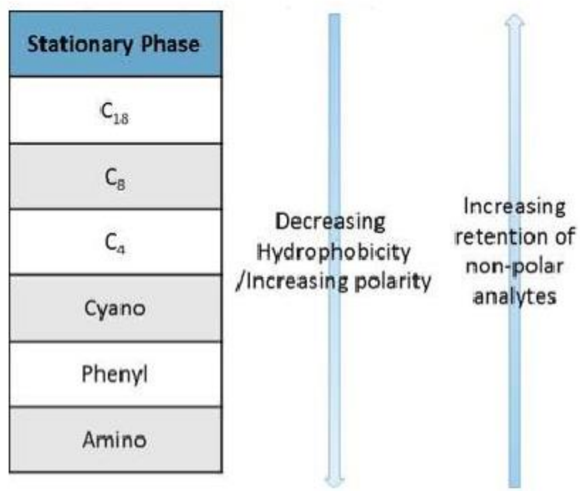
شکل ۶۰-۶) پیوست فاز ثابت به ذرات پر کننده ستون

ترکیبات پلی‌سیلوکسان با ساختارهای مختلف شیمیایی دارای تمایل پیوستی متفاوتی به ترکیبات شیمیایی با درجات قطبیت مختلف هستند (شکل ۶۱-۶). میزان قطبیت ترکیبات آلی در دسته‌بندی‌های مختلف به‌شرح زیر می‌باشد (در این دسته‌بندی، هیدروکربن‌های خطی اشباع شده و آب به‌ترتیب قوی‌ترین ترکیب غیرقطبی و قطبی هستند):

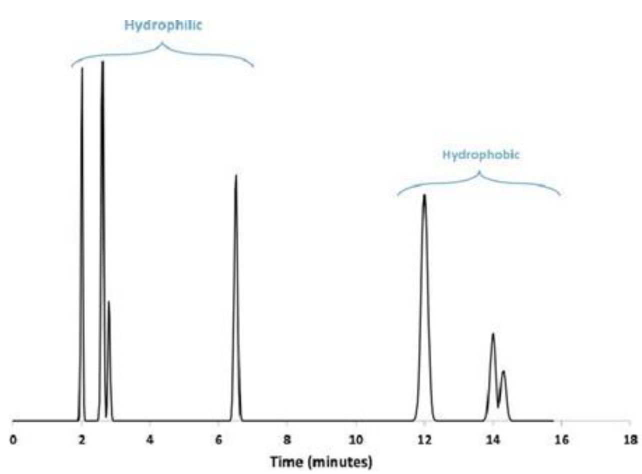
هیدروکربورهای اشباع شده خطی[۱]< هیدروکربورهای اشباع نشده خطی[۲]< ترکیبات حلقوی[۳]< ترکیبات آلی هالوژنه[۴]< ترکیبات آلی گوگرد دار[۵]< اترها[۶]< ترکیبات آلی نیتروژن‌دار[۷]< استرها[۸]< آلدئیدها[۹]= کتون‌ها[۱۰]< الکل‌ها[۱۱]=آمین‌ها[۱۲]< سولفون‌ها[۱۳]< سولفوکسیدها[۱۴]< آمیدها[۱۵]< اسیدهای کربوُکزالیک[۱۶]< آب

1 aliphatic hydrocarbons
2 olefins
3 aromatic hydrocarbons
4 halides
5 sulfides
6 ethers
7 nitro-compounds
8 esters
9 aldehydes
10 ketones
11 alcohols
12 amine
13 sulfones
14 sulfoxides
15 amides
16 carboxylic acids

انتخاب ستون در کروماتوگرافی فاز معکوس با توجّه به میزان قطبیت آن انجام می‌شود. به‌طور کلی برای ترکیبات غیر قطبی از ستون با فاز ثابت C_{18} و برای ترکیبات قطبی از فاز ثابت سیلوکسان با شاخه فنیل و آمینو استفاده می‌شود. در کروماتوگرافی فاز معکوس با توجّه به قطبی بودن فاز متحرک و غیر قطبی بودن فاز ثابت، ترکیبات آب دوست[1] سریع‌تر از ترکیبات آب گریز[2] از ستون خارج می‌شوند (شکل ۶۲-۶).



شکل ۶۱-۶) فاز ثابت کروماتوگرافی در ستون فاز معکوس و قدرت جداسازی آنها برای ترکیبات آلی با قطبیت‌های متفاوت



شکل ۶۲-۶) کروماتوگرام جداسازی ترکیبات آب دوست و آب‌گریز در سیستم فاز معکوس

[1] Hydrophilic
[2] Hydrophobic

HPLC فاز معکوس گزینه بسیار مناسبی برای پایش ترکیبات زیر است:

- **ترکیبات خنثی و غیر قطبی با وزن مولکولی کمتر از ۲۰۰۰ دالتون**
- **ترکیبات دارای ساختارهای مشابه[1]، ترکیبات هیدروکربنی در اندازه‌های مختلف و ترکیبات دارای شاخه حلقوی[2]**
- **اسیدها و بازهای ضعیف**
- **اسیدها و بازهای قوی**
- **پروتئین‌ها و پپتیدها**
- **آمین‌ها**
- **ترکیبات غیر محلول در آب**

۶-۱-۵-۶-۲) جداسازی ترکیبات به شیوه فاز نرمال

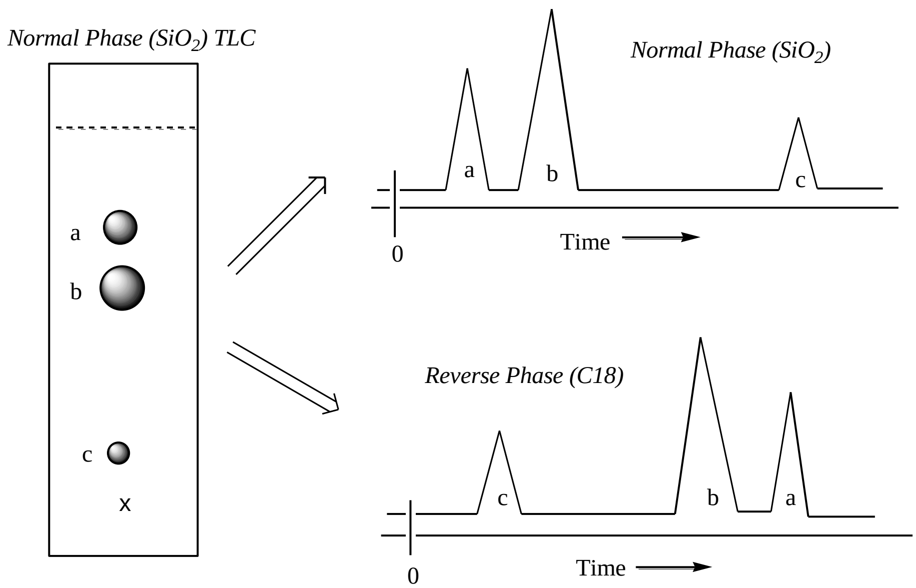
ستون قطبی فاز نرمال از ترکیبات سیلیکا[3]، آمینو[4]، دیول[5] و سیانو[6] به عنوان فاز ثابت استفاده می‌کند که قطبیت آنها به ترتیب کاهش می‌یابد. در دستگاه HPLC فاز نرمال از ترکیبات غیرقطبی مانند حلال‌های ایزو اُکتانات[7]، متیلن کلرید[8]، اتیل استات[9] و غیره به عنوان فاز متحرک استفاده می‌شود. زمان ماندگاری ترکیبات در ستون با افزایش قطبیت فاز متحرک کاهش پیدا می‌کند.

دلایل انتخاب فاز نرمال برای کروماتوگرافی عبارتند از:

- **بهترین نوع کروماتوگرافی برای ترکیبات آب‌گریز است.**
- **امکان جداسازی ایزومرهای ترکیبات آلی را از یکدیگر امکان‌پذیر می‌سازد.**
- **نمونه‌های آلی در حلال غیر قطبی حل می‌شود.**
- **جداسازی ترکیبات غیر قطبی فقط در فاز نرمال امکان‌پذیر است.**

---

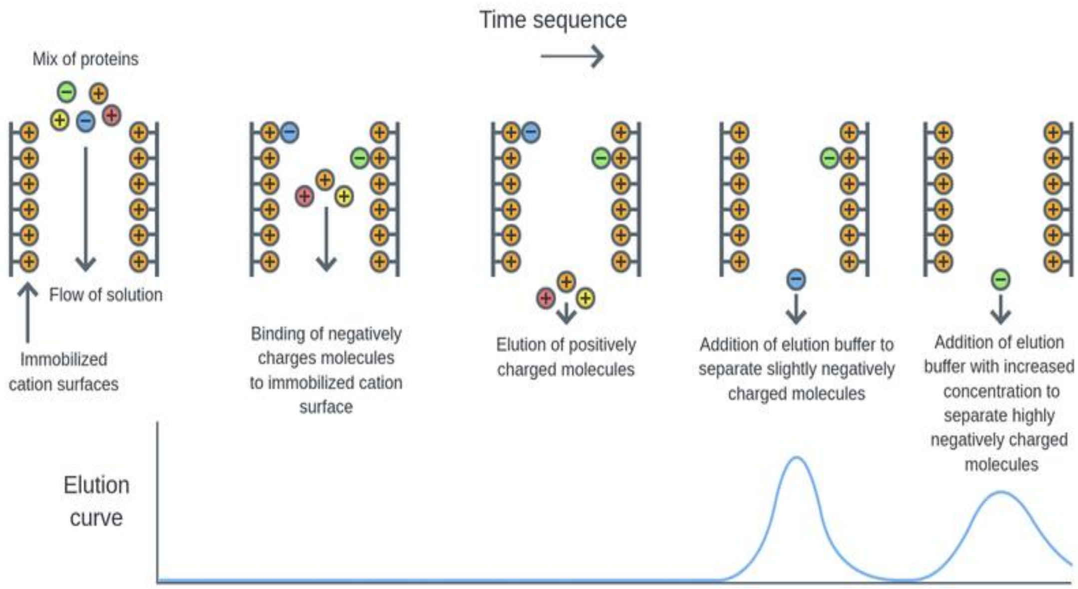
[1] Homologues
[2] Benzologues
[3] Silica
[4] Amino
[5] diol
[6] cyano
[7] iso-octane
[8] methylene chloride
[9] ethyl acetate



شکل ۶۳-۶) تصویری از جداسازی ترکیبات در HPLC با دو فاز نرمال و معکوس

۶-۱-۵-۶-۳) جداسازی ترکیبات به شیوه فاز یونی

جداسازی ترکیبات در فاز یونی به دلیل جاذبه الکترواستاتیکی میان ترکیبات باردار موجود در فاز متحرک (محلول بافر فسفات) و ذرات دارای بار مخالف بر روی جاذب تبادل یون جامد رخ می‌دهد. جاذب تبادل یونی معمولاً از گرانول‌های خنثی، متخلخل و کروی شکل تشکیل شده است که سطح آن‌ها توسط گروه‌های باردار (گروه‌های عملکردی) پوشش داده شده است. بارهای گروه‌های عاملی فاز ثابت با یون‌های ترکیبات تمایل پیوندی دارند و بدین ترتیب سرعت حرکت یون‌ها در ستون‌ها کاهش می‌یابد و ترکیبات به‌طور مجزا جداسازی می‌شوند (شکل ۶۴-۶).



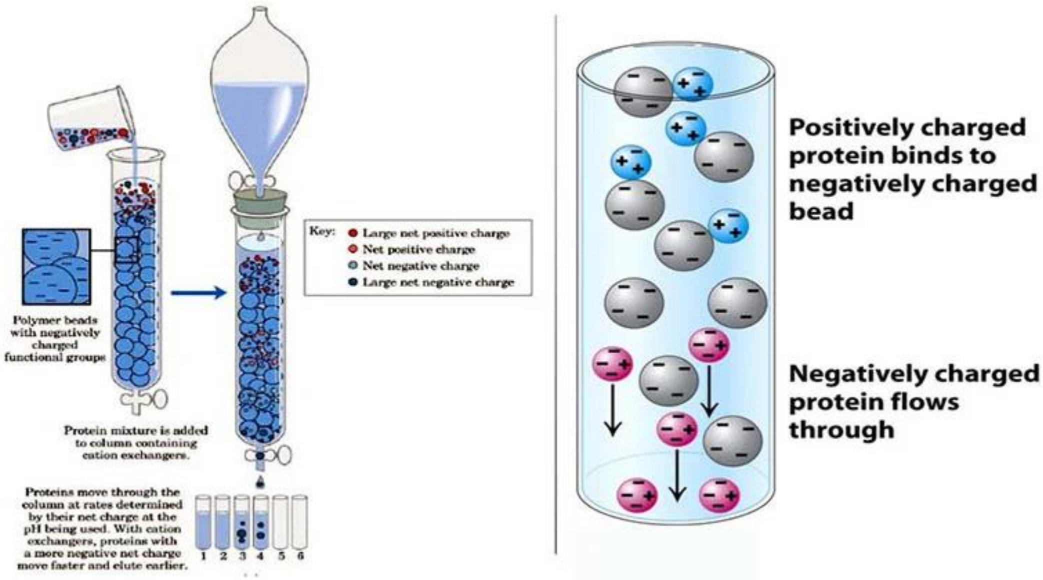
شکل ۶۴-۶) ستون یونی با پوشش سطحی کاتیونی
(ترکیبات با بار مثبت به مراتب زودتر از ترکیبات با بار منفی خارج می‌شوند)

نکات کلیدی در کروماتوگرافی تبادل یونی عبارتند از:

- **مواد پر کننده ستون شامل گروه‌های یونی از قبیل ترکیبات سولفونیک[۱] و تترا آلکیلامونیوم[۲] هستند.**
- **فاز متحرک در کروماتوگرافی یونی شامل یک بافر در محلول آبی است (مانند فسفات[۳]، فرمات[۴] و غیره)**

این روش برای جداسازی آنیون‌های معدنی و آلی و کاتیون‌ها در محلول آبی بسیار مطلوب است.

[1] sulfonic
[2] tetra-alkylammonium
[3] formate
[4] phosphate



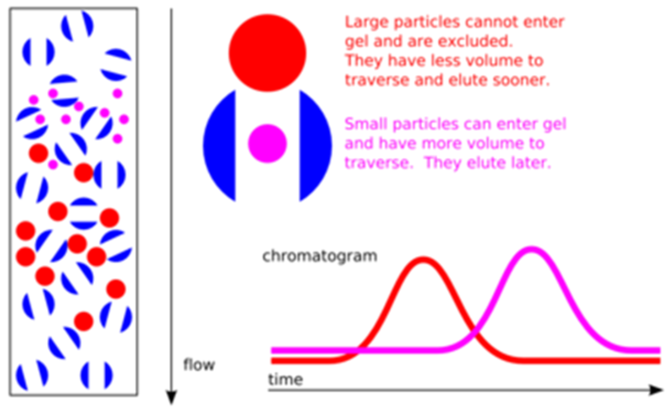
شکل ۶۵-۶) نمای گرافیکی از دستگاه یون کروماتوگرافی و جداسازی ترکیبات یونی مثبت و منفی از یکدیگر

۶-۱-۵-۷)   جداسازی ترکیبات بر اساس اندازه مولکولی

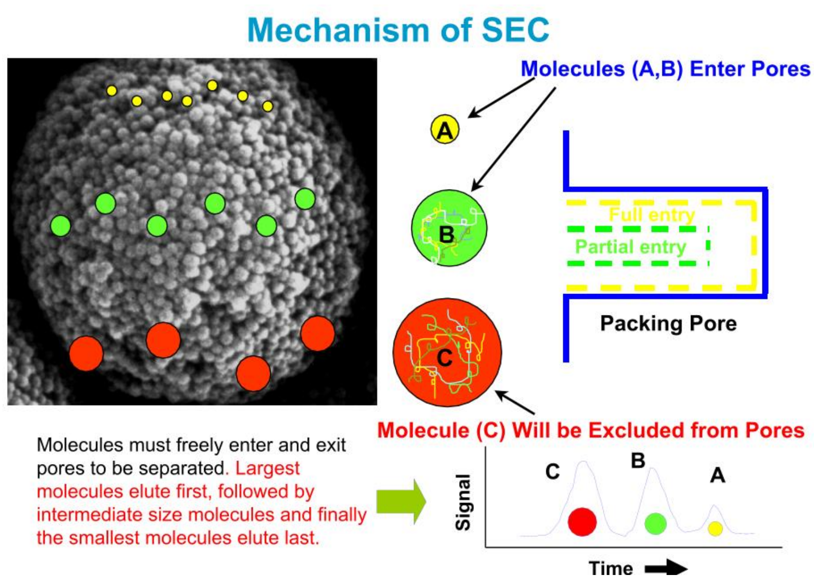
در کروماتوگرافی دارای جداساز ترکیبات بر اساس اندازه مولکولی (SEC)[1]، ترکیبات از طریق عبور از ژل و بر اساس اندازه مولکولی خود جداسازی می‌شوند. ژل از دانه‌های کروی دارای اندازه خاصی از منافذ تشکیل شده است. این ذرات عمدتاً از جنس شیشه یا سیلیکا هستند و یا از پلیمرهایی مختلفی مانند پلیمرهای دکستران[2] (Sephadex)، آگاروز[3] (Sepharose)، پلی آکریلامید[4] (Sephacryl) و یا BioGel P تشکیل شده‌اند. جداسازی ترکیبات در این نوع از دستگاه کروماتوگرافی زمانی اتفاق می‌افتد که مولکول‌هایی با اندازه‌های مختلف از منافذ درون ماتریکس در زمان‌های متفاوت عبور می‌کنند و جدا می‌شوند. به‌عبارت دیگر، ذرات ریز از قابلیت بیشتری برای نفوذ به درون فضای متخلخل فاز ثابت برخوردارند و از این‌رو برای مدت طولانی‌تری در داخل ستون باقی می‌مانند، در حالی که ذرات بزرگتر قابلیت نفوذ به درون فاز ثابت را ندارند و بدون عبور از موانع، سریع‌تر از ستون خارج می‌شوند. در این نوع از کروماتوگرافی از مایعی به عنوان فاز متحرک استفاده می‌شود که آنالیت مورد نظر

[1] Size Exclusion Chromatography
[2] dextran polymers
[3] agarose
[4] polyacrylamide

در آن قابلیت انحلال داشته باشد. این روش برای مولکول‌های بزرگ یا ماکرو مولکول‌ها از قبیل پروتئین‌ها و پلیمرهای صنعتی به‌کار برده می‌شود. اصول جداسازی ترکیبات شیمیایی در سیستم دستگاهی SEC در شکل ۶-۶۶ به اختصار نمایش داده شده است.



شکل ۶-۶۶) تصویر گرافیکی از ستون کروماتوگرافی SEC



شکل ۶-۶۷) فرایند جداسازی ذرات در کروماتوگرافی SEC

۶-۱-۵-۸) مشخصات مواد پر کننده ستون‌های HPLC

ترکیب هیدراته سیلیس (SiO_2) پرمصرف‌ترین ماده برای پر کردن ستون‌های HPLC می‌باشد که شامل شبکه‌ای از پیوندهای سیلوکسان (Si-O-Si) در یک ساختار سه بعدی سفت و سخت است که حاوی منافذ به هم پیوسته می‌باشد. اندازه منافذ و غلظت گروه‌های سیلانول (Si-OH) در پرکننده منافذ طی فرآیند تولید قابل کنترل است. به همین دلیل، طیف وسیعی از محصولات تجاری با سطحی بین ۱۰۰ تا ۸۰۰ مترمربع بر گرم و اندازه منافذ متوسط از ۴ تا ۳۳ نانومتر در دسترس هستند.

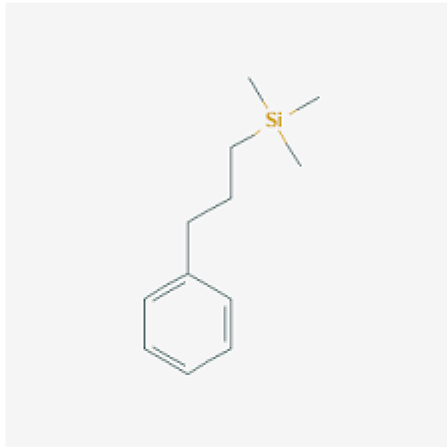
پیوندهای Si-O-Si در پوشش با گروه‌های عاملی مختلف برای جداسازی ترکیبات قطبی، نیمه قطبی و غیر قطبی ساخته می‌شوند. معمول‌ترین سیلوکسان به‌صورت octadecylsilica (ODS) است که حاوی زنجیره کربنی C_{18} است، امّا موادی با زنجیره‌های کربنی C_1، C_2، C_4، C_6، C_8 و C_{22} نیز در دسترس هستند. آخرین فاز باندی مبتنی بر سیلیس معرفی شده، یک ترکیب حاوی زنجیره کربنی C_{30} می‌باشد که برای جداسازی ترکیبات غیر قطبی به‌کار برده می‌شود.

سیلوکسان‌های تخصصی برای اقسام ترکیبات قطبی و نیمه قطبی

طیف گسترده‌ای از سیلوکسان‌ها با قطبیت متوسط از طریق پیوند با گروه‌های عاملی نظیر فنیل، سیانو، نیترو، آمینو، فلوئورو، سولفونو و دیول‌ها تولید می‌شوند و در کاربردهای زیر مورد استفاده قرار می‌گیرند:

- **شاخه عاملی فنیل (Phenyl)**

شاخه عاملی پروپیل فنیل سیلان متصل به ترکیب سیلوکسان، به‌عنوان یک ترکیب با قطبیت ضعیف شناخته می‌شود و برای جداسازی دامنه‌ای از ترکیبات آلی از نمونه‌های مرکب به‌کار می‌رود.



شکل ۶۸-۶) اتصال شاخه عاملی فنیل به ماده پرکننده سیلوکسان

- **شاخه عاملی سیانو (Cyano)**

پوشش بستر پلی‌سیلوکسان با گروه عاملی سیانو در ستون‌های کروماتوگرافی برای آنالیز ترکیبات آلی با قطبیت کم به کار می‌رود. این ستون قابلیت استفاده در هر دو حالت فاز نرمال و فاز معکوس دستگاه HPLC را دارد.

- **شاخه عاملی آمینو (Amino)**

ترکیبات سیلوکسان پیوند داده شده با شاخه عاملی آمینه، آنیون‌های ضعیفی ایجاد می‌کنند. این نوع ستون عمدتاً در حالت فاز نرمال و به‌ویژه برای جداسازی پروتئین‌ها و همچنین ترکیبات حلقوی به‌عنوان فاز ثابت مورد استفاده قرار می‌گیرد.

- **شاخه عاملی فلوئورو (Fluoro)**

ترکیبات سیلوکسان پیوندی با شاخه فلوئور، به‌عنوان جدیدترین نوع مواد پرکننده ستون‌های کروماتوگرافی شناخته می‌شوند. این فاز، به‌طور کلی، آبدوست‌تر از فازهایی با هیدروکربن‌های دارای طول زنجیره کربنی مشابه است.

ستون‌هایی با این مشخصه منحصر به فرد را می‌توان برای جداسازی ترکیبات آلی هالوژنه و ترکیبات چربی‌دوست استفاده کرد.

- **شاخه عاملی سولفانو (Sulfano)**

گروه‌های عاملی سولفونیک ترکیبات را بر اساس برهمکنش‌های آبگریز جدا می‌کنند. این مواد پر شده در ستون‌ها امکان جایگزینی فاز متحرک با تراکم ثابت در طول آنالیز[1] را برای نمونه‌های پیچیده که معمولاً نیاز به فاز متحرک با تراکم متغیر در طول زمان دارند[2] (فاز متحرک با تراکم متغیر در طول آنالیز) را فراهم می‌کنند.

- **شاخه عاملی دیول (Diols)**

گروه‌های عاملی دیول بستر جاذب را تا حدودی قطبی می‌کنند تا بتوان از آن برای جداسازی در فاز نرمال استفاده نمود. این نوع پیوند شیمیایی عمدتاً برای جداسازی مخلوط‌های پیچیده از ترکیبات با قطبیت‌های مختلف استفاده می‌شود که معمولاً زمان ماندگاری طولانی بر روی پلی‌سیلوکسان‌ها دارند.

- **شاخه‌های عاملی متفرقه**

شاخه‌های عاملی متفرقه شامل Ethyl, Nitrophenyl, Ristocetin, Amylose, Avidin, Cyclodextrins, Carbamate ester, Diphenylethyldiamine و نوع Pirkle هستند که به ترکیبات سیلوکسان اضافه می‌شوند و برای جداسازی ترکیبات kiral مفید هستند. این ستون‌ها قابل استفاده برای آنالیز ترکیبات نفتی و پتروشیمی و همچنین ترکیبات محیطی می‌باشند.

---

[1] Isocratic

[2] Gradient Elution

ضمناً برای ستون‌های SEC، نوع خاصی از ترکیبات سیلوکسان در اندازه‌های مختلف با منافذ متفاوت ارائه شده است که دارای مشخصات ویژه‌ای به‌صورت دامنه‌ی محدود اندازه و منافذ هستند.

۶–۱–۵–۹) محدوده pH برای ستون‌های HPLC

pH مفید برای ستون‌های پرشده از ترکیبات پلی‌سیلوکسان در محدوده ۲ تا ۸ توصیه می‌شود، زیرا پیوندهای سیلوکسان در pHهای کمتر از ۲ شکسته می‌شوند و pH بیشتر از ۷.۵ نیز ممکن است منجر به حل شدن سیلیس شود. در نسل جدید ستون‌های HPLC از موادی مانند زیرکونیوم استفاده می‌شود که دارای خصوصیات شیمیایی پایدارتری هستند.

زیرکونیوم یک اکسید فلزی با فرمول ZrO_2 است که از نظر شیمیایی و حرارتی پایدارتر از ترکیبات سیلیکونی است و می‌توان از آن برای جداسازی در دماهای بیشتر از ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد استفاده نمود، به‌طوری‌که بر قدرت یونی یا محتوای آلی فاز متحرک تأثیری نداشته باشد. پوشش‌دهی بستر ستون با زیرکونیوم باعث می‌شود ستون در محدوده وسیع‌تری از pH عملکرد خود را حفظ کند و به‌ویژه برای جداسازی ترکیبات در pHهای بالاتر از ۱۰ نیز کاربرد داشته باشد.

۶–۱–۵–۱۰) مواد پرکننده ستون HPLC در قالب‌های بسته‌بندی شده بر پایه پلیمر

چندین ماده پرکننده با استفاده از پلیمرهای آلی به‌عنوان پرکننده ستون‌های HPLC موجود است. مواد پلیمری زمانی به کار برده می‌شوند که شرایط جداسازی نیاز به فاز متحرکی با pH فراتر از حد تحمل سیلیکا (معمولاً pH معادل ۶.۵ تا ۷) داشته باشد. یکی از مزایای مواد پلیمری، پایداری در محدوده وسیع‌تری از pH است. این مواد همچنین ویژگی‌های گزینش‌پذیری و نگهداری متفاوت‌تری را برای ستون‌های فاز معکوس مبتنی بر ترکیبات سیلیکونی فراهم می‌کنند. علاوه بر این، مواد تبادل یونی از نوع استایرن–دیوینیل بنزن نیز در دسترس هستند که

در آن‌ها اسیدهای سولفونیک، اسیدهای کربوکسیلیک یا گروه‌های آمونیوم چهارتایی در ماتریس پلیمری گنجانده شده‌اند.

۶–۱–۵–۱۱) تکنیک جداسازی با تراکم ثابت از فاز متحرک در طول آنالیز (ایزوکراتیک)

در تکنیک جداسازی به شیوه ایزوکراتیک، ترکیب فاز متحرک در طول دوره آنالیز ترکیبات شیمیایی به صورت ثابت و بدون تغییر باقی می‌ماند. فاز متحرک مخلوط را می‌توان با یک نسبت ثابت توسط پمپ‌های دستگاه کروماتوگرافی تهیه و تحویل داد یا قبل از آنالیز، مخلوط حلال را در شرایط آزمایشگاهی آماده کرده و از طریق یک مخزن منفرد به پمپ دستگاه متصل کرد. این روش ساده‌ترین تکنیک جداسازی است و معمولاً به‌عنوان اولین انتخاب در هنگام طراحی فرآیند جداسازی استفاده می‌شود.

۶–۱–۵–۱۲) تکنیک جداسازی با تراکم متغیر از فاز متحرک در طول زمان (گرادیانی)

آنالیز ترکیبات با استفاده از دستگاه HPLC را می‌توان با تغییراتی در ترکیب فاز متحرک در طول زمان انجام داد که به آن تکنیک جداسازی به شیوه گرادیانی گفته می‌شود. قدرت شستشوی مایع شوینده در طول گرادیان با تغییراتی که در قطبیت، pH یا قدرت یونی فاز متحرک ایجاد می‌شود، بهبود می‌یابد. شستشوی گرادیانی می‌تواند ابزاری قدرتمند برای جداسازی مخلوطی از ترکیبات با ویژگی‌های بسیار متفاوت باشد. این تکنیک عملکردی مشابه با روش جداسازی در GC با استفاده از برنامه‌ریزی دمایی دارد.

تغییر نرخ جریان اجزای تشکیل‌دهنده فاز متحرک در تکنیک گرادیانی توسط یک کنترل‌کننده الکترونیکی یا سیستم داده انجام می‌شود، به‌گونه‌ای که نرخ جریان کلی تأمین‌شده توسط دو پمپ به‌کاررفته ثابت باقی می‌ماند. از طرف دیگر، می‌توان از یک پمپ مجهز به یک شیر تنظیمی استفاده کرد که نسبت دو حلالی را که از دو مخزن مایع وارد پمپ می‌شود، تنظیم نماید. برخی از سیستم‌های HPLC دارای قابلیت کنترل اختلاط فازها به‌صورت

متغیر در طول آنالیز هر نمونه هستند که در نوبت آنالیز بعدی نمونه، ترکیب اولیه فاز متحرک به وضعیت شروع برنامه‌ریزی‌شده در کامپیوتر دستگاه بازگردانده می‌شود.

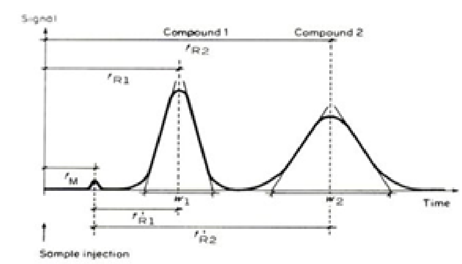
۶-۱-۵-۱۳) کارایی ستون HPLC

سنجش کارایی ستون سیستم دستگاهی HPLC بر اساس بشقابک‌های فرضی[1] به‌عنوان عامل جداسازی ترکیبات، با استفاده از فرمول زیر قابل محاسبه است:

تعداد بشقابک های ستون بصورت تئوری

$$N = 16\left(\frac{t_r}{w}\right)^2 = 5.54\left(\frac{t_r}{w_{0.5}}\right)^2$$

تعداد بشقابک ستون تعیین کننده کیفیت جداسازی ترکیبات از یکدیگر هستند



که در آن:

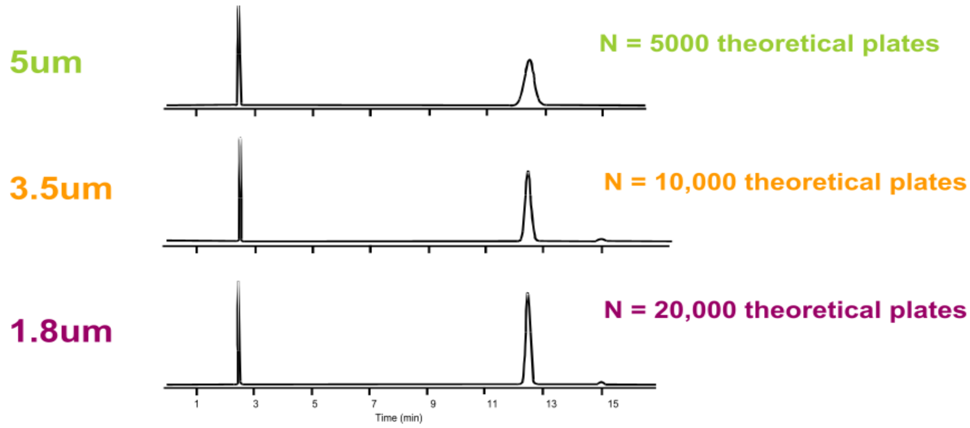
N: تعداد بشقابک‌های فرضی

t_R: زمان ماندگاری ترکیب در ستون

W: قاعده پیک

افزایش در تعداد بشقابک‌های فرضی (همراه با کاهش قطر گوی‌های پر شده ستون و ثابت بودن سایر پارامترها) در ستون کروماتوگرافی باعث کاهش قاعده پیک می‌شود و کیفیت آنالیز را بهبود می‌بخشد (شکل ۶۹-۶).

[1] Plate Number



شکل ۶۹-۶) کیفیت جداسازی ترکیبات بر اساس پارامترهای تعداد بشقابک‌های فرضی ستون و قطر گوی‌های تشکیل دهنده بستر ستون

از پارامترهای دیگر مؤثر بر کیفیت جداسازی، ضریب تفکیک[1] پیک‌های ترکیبات در ستون کروماتوگرافی است که بر اساس فرمول زیر محاسبه می‌شود:

$$R = 2\,\frac{(t_{R2} - t_{R1})}{(w_1 + w_2)}$$

که در آن:

t_{R1}: زمان ظهور پیک یکم

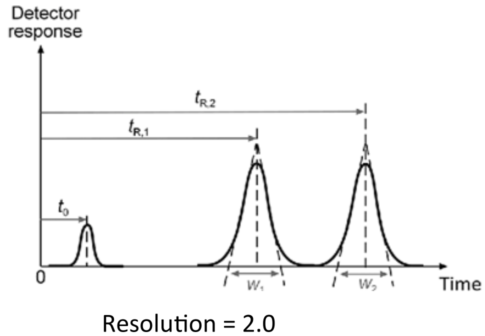
t_{R2}: زمان ظهور پیک ترکیب دوم

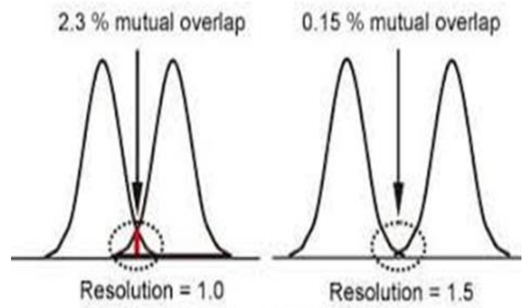
W_1: قاعده پیک نخست

W2: قاعده پیک دوم

ضریب تفکیک در پیک‌های ترکیبات در ستون کروماتوگرافی نیازمند وجود برخی پارامترهای عملیاتی است که در زیر به اختصار توضیح داده شده است:

[1] Resolution





R= فاصله دو پیک از یکدیگر

لازم به‌ذکر است که ضریب تفکیک پیک‌های قابل استناد می‌بایست حداقل ۱.۵ برابر نوسانات خط پایه بیشتر باشد و در شرایط ایده‌آل در حدود ۲ تا ۳ برابر آن قرار گیرد، که در این صورت دو پیک از یکدیگر به‌طور کامل جدا می‌شوند.

R = 1.0: ۱ برابر نوسانات خط پایه (نامطلوب برای تفکیک دو پیک از یکدیگر)

R = 1.5: ۱.۵ برابر نوسانات خط پایه (حداقل کفایت لازم برای تفکیک دو پیک از یکدیگر)

R = 2.0: ۲ برابر نوسانات خط پایه (مطلوب برای تفکیک کامل دو پیک از یکدیگر)

۶-۱-۵-۱۴) آشکارسازهای HPLC

سیستم طیف‌سنج نوری UV-VIS و سیستم انتشار فلورسانس دو مورد از آشکارسازهای مورد استفاده در سیستم دستگاهی HPLC هستند که در بخش‌های قبلی توضیحات لازم در مورد این سیستم‌ها ارائه گردید. آشکارسازهای دیگری مانند آشکارسازهای الکتروشیمیایی، طیف‌سنجی جرمی و طیف‌سنج‌های مادون قرمز نیز ممکن است در دستگاه HPLC مورد استفاده قرار گیرند.

۶-۱-۵-۱۴-۱) آشکارساز جرمی

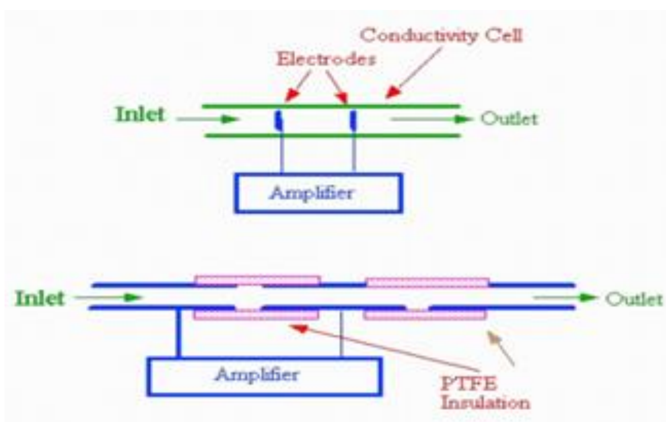
نحوه کارکرد سیستم آشکارساز جرمی در بخش آشکارسازهای دستگاه GC شرح داده شد. به‌طور کلی، کاربرد این سیستم برای HPLC دارای مزیت خاصی نسبت به سایر آشکارسازها است، زیرا اطلاعات مفیدی در خصوص ساختار مولکول آنالیت نیز ارائه می‌دهد. ضمناً، سیستم آشکارساز جرمی می‌تواند مقادیر جزئی از آنالیت مورد نظر را نیز آنالیز نماید.

۶-۱-۵-۱۴-۲) آشکارساز الکتروشیمیایی

آشکارسازهای الکتروشیمیایی جریان حاصل از اکسیداسیون الکترولیتی یا کاهش آنالیت‌ها را در سطح الکترود اندازه‌گیری می‌کنند. این آشکارسازها کاملاً حساس بوده و برای هر ترکیب انتخابی هستند و می‌توانند آنالیت را در حداقل مقدار ۱۰-۱۵ مول نیز آنالیز نمایند. مبنای عملکرد در این آشکارسازها، اندازه‌گیری جریان الکتریسیته در واکنش‌های اکسیداسیون و احیای ترکیبات خروجی از سیستم HPLC است. سیستم الکتروشیمیایی برای شناسایی ترکیباتی از قبیل فلزات سنگین، هیدروکربورها، الکل‌ها و کتون‌ها بر مبنای قابلیت اکسیداسیون یا احیای آنها می‌تواند استفاده شود.

۶-۱-۵-۱۴-۳) آشکارساز هدایت الکتریکی

سیستم آشکارساز هدایت الکتریکی برای آنالیز ترکیبات یونی (آنیون‌ها و کاتیون‌ها) با قابلیت هدایت الکتریکی به‌کار گرفته می‌شود. این سیستم، جریان الکتریکی ایجاد شده توسط ترکیبات یونی را اندازه‌گیری می‌نماید. میزان جریان الکتریکی سنجش شده به این روش با تراکم یونی ترکیبات مورد نظر متناسب است (شکل ۷۰-۶).



شکل ۷۰-۶) تصویر گرافیکی آشکارساز هدایت الکتریکی

۶-۱-۵-۱۵) روش‌های پیشرفته آنالیز

روش‌های پیشرفته آنالیز[1] به مفهوم کاربرد همزمان چند تکنیک برای آنالیز بهتر آنالیت‌ها می‌باشد. در کاربرد سیستم دستگاهی HPLC که معمولاً مجهز به آشکارسازهای طیف سنجی نوری یا فلورسانس هستند، معمولاً از یک آشکارساز تکمیلی دیگر نیز برای تشخیص آنالیت استفاده می‌شود.

توسعه تکنیک‌های پیشرفته در سال‌های اخیر، شناسایی ترکیبات موجود در یک نمونه را بهبود بخشیده است. این تکنیک‌ها شامل HPLC-MS، HPLC-MS-MS، HPLC-IR و HPLC-NMR می‌باشد. در این تکنیک‌ها معمولاً جداسازی کروماتوگرافی و به دنبال آن آشکارسازی پیک با استفاده از یک آشکارساز سنتی مانند UV انجام می‌شود و سپس در یک مرحله پیشرفته‌تر، شناسایی ترکیب مجهول با استفاده از کتابخانه طیف‌سنجی MS، IR یا NMR انجام می‌گردد.

جدول ۱۸-۶) حد تشخیص آشکارسازهای مختلف در سیستم دستگاهی HPLC

نوع سیستم آشکارساز	LOD
UV-VIS	۱۰ pg
Conductivity	۱۰۰ pg -۱ ng
Electrochemical	۱۰۰ pg
Fluorescence	۱۰۰ fg
FTIR	۱ µg
Mass Spectrometers	<۱۰۰ pg

* Fg= فمتوگرم[2] و معادل با $۱۰^{-۱۵}$ گرم

---
[1] Hyphenated techniques
[2] Femtogram

۶–۱–۵–۱۶) کاربرد سیستم‌های آنالیز دستگاهی HPLC در رشته مهندسی بهداشت حرفه‌ای

سیستم دستگاهی HPLC از روش‌های مدرن آنالیز است که دارای کاربردهای بسیار زیادی در آنالیز نمونه‌های پایش فردی است. این سیستم در روش‌های استاندارد NIOSH و OSHA مکرراً استفاده شده است که سایت زیر گواه این گفته است:

https://yiqi-oss.oss-cn-hangzhou.aliyuncs.com/aliyun/900101420/solution/213549.pdf

روش‌های آنالیز دستگاهی HPLC همچنین می‌توانند در پایش بیولوژیکی کارکنان نیز به‌کار برده شوند. پایش بیولوژیکی می‌تواند راهی مکمل برای اندازه‌گیری مواجهه کارکنان با ترکیبات شیمیایی یا عوامل فیزیکی از طریق مسیرهای مختلف تماس باشد. شاخص‌های زیستی[۱] می‌توانند مواجهه شغلی و محیطی را تشخیص دهند یا حساسیت افراد به مواجهه شغلی آشکار کنند. پایش بیولوژیکی ممکن است در سطح گروهی یا فردی تفسیر شود. معمول‌ترین نمونه‌ها برای پایش بیولوژیکی ادرار و خون هستند. در حالی‌که برای تعداد زیادی از مواد شیمیایی می‌توان پایش بیولوژیکی را انجام داد، هنوز تعداد محدودی از ترکیبات دارای شاخص بیولوژیکی تماس هستند. اولین مقاله در مورد پایش زیستی شغلی در ایالات متحده در اوایل دهه هشتاد میلادی منتشر شد و پس از آن مقالات و کارهای تحقیقاتی در این زمینه آغاز گردید.

پایش بیولوژیکی[۲] در رشته مهندسی بهداشت حرفه‌ای می‌تواند مواجهه شغلی کارکنان را از طریق اندازه‌گیری متابولیت‌های ترکیبات جذب شده[۳] در نمونه‌های بیولوژیکی بدن مانند خون، ادرار، بزاق، شیر مادر، عرق و سایر نمونه‌ها مانند مدفوع، مو، دندان و ناخن و یا اثرات ترکیبات در سیستم‌های هدف[۴] تخمین بزند. پایش بیولوژیکی در طب کار برای تشخیص مواجهه و اثرات بالقوه ترکیبات به‌کار برده می‌شود. پایش بیولوژیکی در رشته بهداشت حرفه‌ای به‌عنوان روش مکملی برای تشخیص مواجهه شغلی به کار برده می‌شود. کاربرد پایش بیولوژیکی در کشورهای اروپایی رایج‌تر از کشور آمریکا است. سابقه پایش بیولوژیکی کارکنان در کشورهای مختلف به سال‌های

---

[1] Biomarkers
[2] Biomonitoring
[3] Biomarker of Internal Dose
[4] Biomarker of Biological Effective Dose

۱۹۸۰ میلادی برمی‌گردد. در طول دهه‌های اخیر، این نوع پایش پیشرفت‌های زیادی نموده است و بر اساس پیش‌بینی کارشناسان، در آینده برای برخی از ترکیبات مخاطره‌آمیز از جمله ترکیبات مختل‌کننده غدد درون‌ریز، دود سیگار، داروهای سرطانی و آفت‌کش‌ها یک روش ارجح اندازه‌گیری خواهد بود.

در راستای پایش بیولوژیکی توسط نگارنده این کتاب و همکاران، موضوع پایش بیولوژیکی کارکنان آبکاری کروم در یکی از صنایع اطراف تهران انجام گردید. در این پروژه پایش شغلی کارکنان در صنعت آبکاری با ترکیب کروم شش ظرفیتی مورد بررسی قرار گرفت و ترکیب مالون دی آلدئید (MDA)[1] در سرم خون آنها به‌عنوان شاخص بیولوژیکی تماس با کروم شش ظرفیتی اندازه‌گیری گردید. نتایج این مطالعه نشان داد که ۸۷٪ از کارگران آبکاری دارای مواجهه شغلی بیشتر از OEL بودند. برای پایش بیولوژیکی این کارگران، ۱۰ میلی‌لیتر خون از شرکت‌کنندگان جمع‌آوری شد و در لوله‌های ۱۵ میلی‌لیتری حاوی EDTA ریخته شد. سپس سرم خون آنها به مدت ۱۵ دقیقه با سانتریفیوژ در دور ۵۰۰۰ RPM جدا گردید. سرم خون در دمای ۲۰- درجه سانتی‌گراد تا زمان اندازه‌گیری ترکیب MDA نگهداری شد. مقدار ۵۰ میکرولیتر سرم به ۲۵۰ میکرولیتر پرکلریک اسید ۰.۱ مولار و ۷۰۰ میکرولیتر آب دیونیزه اضافه شد و سپس محلول با سرعت ۵۰۰۰ RPM به مدت ۱۰ دقیقه سانتریفیوژ شد. سپس مقدار ۲۰ میکرولیتر از محلول آماده‌سازی شده برای آنالیز ترکیب MDA به دستگاه HPLC مجهز به ستون RP18 تزریق گردید. فاز متحرک از ۶۵٪ متانول و ۳۵٪ در غلظت ۳۰ میلی‌مولار از ترکیب KH2PO4 تشکیل شده بود و گذر حجمی فاز متحرک به میزان ۱ میلی‌لیتر در دقیقه تنظیم گردید. آشکارساز UV دستگاه HPLC در طول موج ۲۵۴ نانومتر تنظیم گردید.

همانطور که بیان شد مواجهه اکثر کارکنان در این مطالعه به‌طور قابل ملاحظه‌ای بیشتر از OEL بود و میانه سطح سرمی MDA در کارگران دارای تماس شغلی با کروم شش ظرفیتی به طور معنی‌داری بیشتر از کارگران

---
[1] Malondialdehyde

گروه شاهد دیده شد ($p<0.001$). ضریب همبستگی بین سطح MDA و میزان مواجهه شغلی با کروم شش ظرفیتی به‌صورت معنی‌دار آماری مشاهده شد ($p< 0.001$).

استفاده از MDA سرم به‌عنوان دُز مؤثر بیولوژیکی کارکنان در مواجهه با کروم شش‌ظرفیتی این مزیت را داشت که مواجهه صرفاً منحصر به سطح کروم شش‌ظرفیتی بود و شامل کروم سه‌ظرفیتی نمی‌شد. لازم به‌ذکر است که در این مطالعه، عوامل مخدوش‌کننده مرتبط با افزایش MDA سرم خون می‌توانست به‌صورت استعمال دخانیات مطرح گردد که تأثیر آن در این مطالعه به‌روش آماری کنترل گردید. بر اساس اطلاعات به‌دست‌آمده در این مطالعه، MDA سرم را می‌توان به‌عنوان یک شاخص بیولوژیکی غیر اختصاصی برای مواجهه با کروم شش‌ظرفیتی در محدوده مواجهه شغلی ۰.۰۰۰۹ تا ۰.۴۷ میلی‌گرم بر متر مکعب مورد استفاده قرار داد. با توجّه به تازگی یافته‌های ارائه‌شده در مورد پایش بیولوژیکی کارگران آبکاری، مطالعات بیشتری در این زمینه برای نهادینه‌کردن ترکیب MDA به‌عنوان شاخص بیولوژیکی تماس توصیه می‌گردد.

از کاربرد سیستم آنالیز دستگاهی HPLC برای پایش بیولوژیکی یک گروه از کارکنان در مواجهه با ترکیب فرمالدئید می‌توان نام برد که به‌شرح زیر گزارش می‌شود.

فرمالدئید یک ترکیب سرطان‌زای کلاس ۱ (سرطان‌زای انسانی) بر اساس دسته‌بندی سازمان IARC است و این ترکیب به‌طور معمول در سالن‌های آناتومی استفاده می‌شود. بررسی مواجهه کارگران با این ترکیب، به‌ویژه با توجّه به قابلیت جذب پوستی علاوه بر مواجهه استنشاقی و گوارشی، در یک مطالعه مقطعی و به روش پایش بیولوژیکی مورد توجّه قرار گرفت.

این مطالعه مقطعی با جامعه آماری ۲۰ نفر از کارکنان سالن تشریح دانشگاه انجام شد. مواجهه شغلی کارکنان با ترکیب فرمالدئید به روش ۲۰۱۶ سازمان NIOSH مورد بررسی قرار گرفت. هوای بازدم شرکت‌کنندگان پس از پایان شیفت کاری در کیسه تدلار جمع‌آوری و به روش ۲۰۱۶ ترکیب فرمالدئید بر روی کارتریج نمونه‌برداری جمع‌آوری و مورد آنالیز قرار گرفت. داده‌های به‌دست‌آمده از مواجهه شغلی کارکنان با ترکیب فرمالدئید و مواجهه

داخلی از طریق اندازه‌گیری ترکیب فرمالدئید در هوای بازدم با استفاده از تحلیل آماری همبستگی مورد بررسی قرار گرفت.

نمونه‌برداری فردی بر اساس دستورالعمل ۲۰۱۶ سازمان NIOSH با هواگذر ۰.۱ لیتر در دقیقه به مدت ۲ ساعت با استفاده از لوله‌های جاذب شرکت SKC نمونه‌برداری گردید. لوله‌های جاذب متشکل از گرانول سیلیکاژل پوشش داده شده با ترکیب Dinitrophenylhydrazine (DNPH) -۴-۲ به‌شماره ۱۱۹-۲۲۶ بودند. ترکیب فرمالدئید جذب شده بر روی لوله جاذب با حلال استونیتریل گرید HPLC (شرکت مرک، آلمان) استخراج شد و توسط دستگاه HPLC مدل D-7000 ساخت شرکت Merck-Hitachi مجهز به آشکارساز UV در طول موج ۳۶۰ نانومتر آنالیز گردید. فاز متحرک شامل ۴۵٪ استونیتریل و ۵۵٪ آب بود که در حجم ۲۰ میکرولیتر به ستون کروماتوگرافی (دارای بدنه‌ای از جنس استیل ضد زنگ و با ابعاد ۱۵۰× ۳.۹ میلی‌متر و پر شده از ترکیبات هیدروکربنی C-18 با ابعاد μm ۵) تزریق گردید.

برای هر مجموعه از نمونه‌برداری، یک نمونه شاهد نیز مورد آنالیز قرار گرفت. قبل از جمع‌آوری هوای بازدم شده برای پایش بیولوژیکی، هوای ریه‌های پرسنل از طریق استنشاق هوای تمیز با غلظت فرمالدئید کمتر از LOD به مدت ۱۰ دقیقه شسته شد.

پس از اتمام شستشوی ریه، هوای بازدم پرسنل اطاق تشریح در کیسه‌های تدلار ۵ لیتری از قبل شسته شده جمع‌آوری شدند. سپس چهار لیتر هوا بازدمی از طریق یک پمپ با سرعت جریان حدود ۰.۱ لیتر در دقیقه از لوله‌های جاذب سیلیکاژل پوشیده شده با DNPH عبور داده شد. فرمالدئید جذب شده از هوای بازدم بر روی سیلیکاژل نیز طبق روش ۲۰۱۶ استخراج و همانند آنچه قبلاً برای نمونه‌های فردی توضیح داده شد، تجزیه شدند.

میانگین و انحراف معیار سن و سابقه کاری کارکنان آناتومی به ترتیب معادل ۰.۴۶±۴۱.۵ و ۰.۳۶±۱۵ سال بود. دامنه غلظت ترکیب فرمالدئید در مواجهه فردی پرسنل ۸ الی ۳۰۰ میکروگرم بر متر مکعب بود. ضریب

تغییرات برون‌روز از ۱.۶۵٪ تا ۶.۵۱٪ و ضریب تغییرات درون‌روز از ۰.۸۴٪ تا ۴.۳۱٪ متغیر بود. درصد بازیابی نمونه‌های فرمالدئید ۷±۱۰۰٪ و مقادیر LOD و LOQ به ترتیب معادل ۲۳ و ۷۷.۵ میکروگرم بر متر مکعب بود.

میانگین مواجهه شغلی پرسنل و همچنین میانگین غلظت فرمالدئید در هوای بازدم کارکنان آناتومی به ترتیب ۳۴±۶۹۸ و ۱۷±۱۹۵بر حسب ppb بود. همبستگی مثبت و معنی‌دار آماری بین میزان مواجهه خارجی و تراکم فرمالدئید در هوای بازدم (دوز داخلی) مشاهده شد (R square =۰.۴۷۸ ،p< ۰.۰۰۱).

با توجّه به همبستگی معنی‌دار آماری بین مواجهه شغلی و تراکم فرمالدئید در هوای بازدم پرسنل سالن تشریح، پایش بیولوژیکی فرمالدئید می‌تواند از طریق اندازه‌گیری آن در هوای بازدم امکان‌پذیر باشد. هرچند که برای تحقق پایش بیولوژیکی مواجهه با فرمالدئید، مطالعات بیشتری برای تأیید نتایج مطالعه فعلی مورد نیاز است. با توجّه به اهمیت روش ۲۰۱۶ سازمان NIOSH برای پایش فردی و پایش بیولوژیکی، لازم دانسته شد که روش نمونه‌برداری و آنالیز فرمالدئید به‌طور مشروح برای خوانندگان محترم این بخش ترجمه و ارائه گردد.

روش شماره ۲۰۱۶ سازمان NIOSH برای آنالیز فرمالدئید

نمونه‌بردار

نمونه‌بردار از جنس سیلیکاژل با پوشش 2,4-dinitrophenylhydrazine

گذر حجمی: L/min ۱.۵-۰.۰۳

حداقل حجم نمونه: $1\ L\ @\ 0.25\ mg/m^3$

حداکثر حجم نمونه: $15\ L\ @\ 2.5\ mg/m^3$

نحوه آماده‌سازی نمونه برای ارسال به آزمایشگاه: نمونه‌بردار درپوش زده می‌شود و در یخدان و شرایط برودتی به آزمایشگاه ارسال می‌شود.

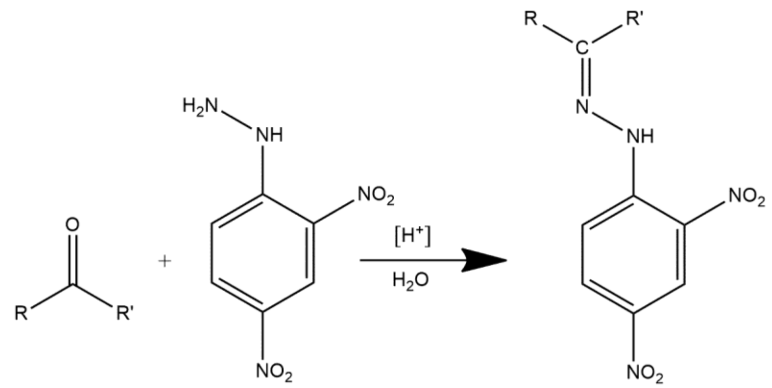
پایداری نمونه: ۳۴ روز در شرایط دمایی ۵ °C

تعداد نمونه‌های شاهد: ۲ تا ۱۰ نمونه شاهد محیطی برای هر سری از نمونه‌های مورد

اندازه‌گیری

روش آنالیز دستگاهی: HPLC همراه با آشکارساز UV

ترکیب هدف برای آنالیز: کمپلکس ترکیب فرمالدئید با ترکیب 2,4-dinitrophenylhydrazine که به‌صورت یک کمپلکس جدید توسط تکنیک HPLC-UV اندازه‌گیری می‌شود و نوع واکنش صورت گرفته در شکل ۷۱-۶ نمایش داده شده است.



شکل ۷۱-۶) کمپلکس ترکیب فرمالدئید با ترکیب 2,4-dinitrophenylhydrazine

نحوه استخراج ترکیب از لوله جاذب: شستشوی واسطه جاذب با ۱۰ میلی‌لیتر از حلال Acetonitrile carbonyl-free

میزان تزریق به دستگاه HPLC-UV: ۲۰ µl

مشخصات فاز متحرک:(v/v) water ٪۵۵/ acetonitrile ٪۴۵ با گذر حجمی ۱.۳ mL/min

ستون کروماتوگرافی: 3.9×150-mm, stainless steel, packed with 5-µm C-18

آشکارساز سیستم آنالیز دستگاهی: UV @ ۳۶۰ nm

کالیبراسیون دستگاه: نمونه‌های ساخته شده از ترکیب فرمالدئید و آب

گستره غلظتی استاندارد: ۰.۲۳ تا ۳۷ میکروگرم بر نمونه

LOD تخمین زده شده: ۰.۰۷ µg/sample

تکرارپذیری آنالیز نمونه‌ها: ۱ تا ۲۰ µg/sample @ ۰.۰۳۲

اعتبار و درستی روش ۲۰۱۶ بر اساس اطلاعات سازمان NIOSH

دامنه غلظتی مطالعه شده: ۰.۰۲۵ تا ۲.۴۵ mg/m^3 برای حجم نمونه‌برداری ۲۲ لیتر

میانگین تکرارپذیری برای غلظت‌های مختلف فرمالدئید هوا: ۰.۰۵۷

درستی نمونه‌های آنالیز شده (Accuracy): ٪۱۹ ±

تورش (Bias) آنالیز نمونه‌ها: ٪۴.۴+

کارایی روش

قابلیت روش برای اندازه‌گیری غلظت فرمالدئید هوا در دامنه mg/m^3 ۰.۱۵ تا ۲.۵ و یا ppm ۰.۰۱۲ تا ۲ برای نمونه‌برداری به حجم ۱۵ لیتر گزارش شده است. از این روش می‌توان برای تعیین فرمالدئید در ارزشیابی مواجهه کارکنان و مقایسه با دو استاندارد (TLV-STEL =۰.۳ ppm و TLV-TWA=۰.۱ ppm) استفاده نمود.

مداخله کننده‌ها

بر اساس تحقیقات انجام شده مشخص شده است که اُزن با معرف ۲،۴-دی نیتروفنیل هیدرازین2)، (4-DNPHدر لوله‌های جاذب واکنش داده و قابلیت واکنش‌پذیری آن را با فرمالدئید از بین می‌برد. کتون‌ها و سایر آلدئیدها می‌توانند با 2،4-DNPH واکنش دهند. مشتقات تولید شده، در این شرایط می‌توانند در کروماتوگرافی از مشتق فرمالدئید جداسازی شوند.

روش‌های دیگر برای آنالیز فرمالدئید در هوا

روش‌های ۲۵۴۱ و ۳۵۰۰ از سازمان NIOSH و روش ۵۲ از سازمان OSHA. روش۵۷۰۰ سازمان NIOSH از کمپلکس 2،4-DNPH تشکیل شده با استفاده از دستگاه HPLC برای تعیین فرمالدئید روی پارچه یا گرد و غبار چوب استفاده می‌کند.

معرف‌ها

۱. محلول استاندارد مادر فرمالدئید در غلظت mg/ml ۱ در آب تهیّه می‌شود (لازم به‌ذکر است که محلول استاندارد فرمالدئید در غلظت mg/ml ۴ به‌صورت تجاری در دسترس است)*

۲. استونیتریل تقطیر شده با مقدار کم کربونیل**

۳.آب دیوینزه

۴. سولفوریک اسید با نرمالیته ۰.۲ و یا ۰.۱ نرمال

۵. هیدروکسید سدیم ۰.۰۱ نرمال

۶. سولفیت سدیم (Na_2SO_3) ۱.۱۳ مولار

۷. محلول اندیکاتور Thymophthalein ۰.۰۴ (w/v) حل شده در اتانول:آب ۵۰:۵۰

***به اقدامات احتیاطی ویژه مراجعه کنید.**

**محتوای کربونیل استونیتریل می‌تواند با عبور دادن ۱۰ میلی‌لیتر از حلال یک کارتریج سیلیکاژل پوشش داده شده با DNPH تهیّه شود که پس از آنالیز توسط HPLC محتوای فرمالدئید آن باید زیر LOD باشد.

وسایل و لوازم برای آنالیز نمونه‌ها

نمونه‌بردار شامل یک لوله پلاستیکی حاوی ۰.۳۵ گرم سیلیکاژل با اندازه مش (۶۰-۱۰۰) می‌باشد که با ۱ میلی‌گرم ۲،۴-دی تروفنیل هیدرازین اسیدی شده پوشش داده شده است. افت فشار در نمونه‌بردار در گذر حجمی ۱.۵ لیتر در دقیقه نباید بیشتر از ۲۸ اینچ آب (۷ کیلو پاسکال) باشد.

نمونه‌بردارها به‌صورت تجاری نیز موجود می‌باشند(LpDNPH cartridge, cat. No. 2-1014; Waters [Supelco S10 Corp. Sep-Pak XPoSure Aldehyde Sampler, part No. WATO47205; for .

۱- پمپ نمونه‌برداری فردی با قابلیت تأمین هواگذر L/min ۰.۰۳ تا ۱.۵
۲- لوله اتصال پلاستیکی انعطاف‌پذیر
۳- ویال ۴ میلی‌لیتری، شیشه با درپوش از نوع تفلون PTFE
۴- ویال، ۲۰ میلی‌لیتری شیشه‌ای
۵- توجّه: از ویال‌های با پوشش داخلی "polycone" استفاده نکنید زیرا منبع فرمالدئید در نمونه‌های شاهد است.
۶- HPLC با آشکارساز UV و متصل به سیستم کامپیوتر و ستون
۷- سرنگ ۱۰۰ یا ۵۰۰ میکرولیتری و یا ۱۰ میلی‌لیتری
۸- فلاسک‌های حجمی ۱۰ میلی‌لیتری، ۲۵ میلی‌لیتری و ۱ لیتری
۹- بورت، ۵۰ میلی‌لیتری
۱۰- PHمتر
۱۱-همزن مغناطیسی
۱۲-بشر ۵۰ میلی‌لیتری
۱۳-فلاسک و ارلن مایر ۲۵۰ میلی‌لیتری
۱۴-فویل آلومینیومی

اقدامات احتیاطی ویژه: فرمالدئید یک ماده سرطان‌زا و حساسیت‌زای اثبات شده برای انسان است. تمام اقدامات باید در زیر یک هود مناسب آزمایشگاهی انجام شود. همچنین استونیتریل سمی است و خطر آتش‌سوزی دارد. (نقطه اشتعال ^{o}C ۱۲.۸).

نمونه‌برداری

۱. هر پمپ نمونه‌برداری فردی را با یک نمونه‌بردار (لوله جاذب پر شده از سیلیکاژل با پوشش 2,4-dinitrophenylhydrazine) در مدار و یک اسکرابر اُزن متصل به ابتدای لوله جاذب کالیبره نمایید.

۲. نمونه‌بردار را از بسته‌بندی باز نمایید و درپوش‌های انتهایی را بردارید.

۳. نمونه‌بردار را با لوله‌های انعطاف‌پذیر پلاستیکی به پمپ نمونه‌برداری وصل کنید. نمونه‌بردار ساخته شده توسط شرکت Waters دو جهته است و می‌تواند از هر طرف به پمپ وصل شود.

توجّه: در این نمونه‌بردار، بخش پشتیبان برای تعیین شکست جذب حجمی وجود ندارد و در صورتی‌که غلظت بالایی از آلدئیدها و کتون‌ها در محیط پیش‌بینی شود، باید دو نمونه‌بردار را به‌صورت سری به هم متصل کنید. در شرایط اتصال دو نمونه‌بردار به‌صورت سری، فشار ست نمونه‌برداری ممکن است زیاد شود و بدین ترتیب دستیابی به هواگذر زیاد ممکن است امکان‌پذیر نباشد.

۴. از حجم هوایی در دامنه ۱ تا ۱۵ لیتر با هواگذر L/min ۰.۰۳ تا ۱.۵ نمونه‌برداری کنید.

توجّه: برای محافظت در برابر نور شدید، مانند نور خورشید، نمونه‌بردار را می‌توان با فویل آلومینیوم یا نوار سیم پوشش داد. پس از اتمام فرآیند نمونه‌برداری، دو انتهای نمونه‌بردار را می‌بایست با درپوش پوشش داده و آن را در پاکت قرار دهید و از نمونه‌ها در برابر گرما محافظت کنید. نمونه‌ها را در جعبه حاوی یخ (۰ درجه سانتی‌گراد) به آزمایشگاه انتقال دهید.

آماده‌سازی نمونه‌ها

تذکر: استونیتریل را از نظر درجه خلوص فرمالدئید با شستشو و تجزیه یک کارتریج نمونه‌بردار شاهد بررسی کنید. سطح فرمالدئید باید کمتر از LOD باشد. از آنجا که سطوح پایه فرمالدئید در نمونه‌بردارها ممکن است در کارتریج‌های مختلف متفاوت باشد، نمونه‌های مورد و نمونه‌های شاهد باید از یک بسته حاوی کارتریج انتخاب شوند. نمونه‌های مورد و شاهد را در شرایط یکسان نگهداری کنید.

۵. مشتقات حاصل از ترکیب فرمالدئید با DNPH را از کاتریج نمونه‌بردارها با مقدار ۱۰ میلی‌لیتر استونیتریل شستشو دهید. در این میان، ممکن است بخشی از حجم استونیتریل از کارتریج نمونه‌برداری عبور نکند که معمولاً معادل ۰.۵ میلی‌لیتر از حجم ۱۰ میلی‌لیتر استونیتریل تزریقی می‌باشد.

الف) مایع حاصل از شستشوی هر نمونه‌بردار را در یک بالن ژوژه ۱۰ میلی‌لیتری جمع‌آوری کنید.

ب) در صورت کاهش حجم نمونه مایع جمع‌آوری شده را با استونیتریل به حجم ۱۰ میلی‌لیتر برسانید.

کالیبراسیون و آزمون کنترل کیفی آنالیز

۶. در روز با حداقل شش محلول استاندارد در دامنه غلظتی خواسته شده، خط کالیبراسیون را به‌شرح زیر محاسبه نمایید:

الف) محلول استاندارد مادر را در غلظت ۱ mg/mL با اضافه نمودن ۲.۷ میلی‌لیتر از فرمالین ۳۷٪ به یک لیتر از آب دیونیزه تهیّه نمایید. لازم به‌ذکر است این محلول مادر برای حداقل سه ماه در دمای اطاق پایدار است. سپس محلول

استاندارد مادر را ۱۰۰ مرتبه رقیق‌سازی نمایید و محلول به دست آمده در غلظت µg/ml ۱۰ را برای ساخت استانداردهای روزانه به‌شرح زیر آماده نمایید.

ب) روزانه حداقل شش نمونه استاندارد کاربردی را برای ترسیم خط کالیبراسیون آماده نمایید. بدین ترکیب از استاندارد µg/ml ۱۰ به حجم‌های ۱۰، ۲۰، ۵۰، ۸۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ میکرولیتر را با استفاده از یک سرنگ ۱۰۰ میکرو لیتری برداشت کرده و به ورودی کارتریج نمونه‌بردارها تزریق کنید. به این استانداردهای تهیّه شده اصطلاحاً نمونه‌های اسپایک[1] گفته می‌شود.

ج) میزان جرمی نمونه‌های spike شده در دامنه ۰.۱ تا ۲ میکروگرم فرمالدئید بر نمونه است که با حجم متوسط نمونه‌برداری ۱۰ لیتر در دامنه غلظت ppm ۰.۰۰۸ تا ۱.۵ است.

د) نمونه‌های Spike شده را از مراتب قبلی طبق بخش پنجم آماده‌سازی نمایید.

و) ۳ میلی‌لیتر از نمونه آماده‌سازی شده مرتبه قبلی را در یک ویال ۴ میلی‌لیتری وارد نمایید و طبق مراتب ۸، ۱۰ و ۱۱ آنالیز نمایید. ضمناً، طبق دستورات زیر برای آنالیز و محاسبه خط کالیبراسیون عمل نمایید. همچنین، دو مجموعه از نمونه‌های شاهد را از طریق تزریق آب دیونیزه به کاتریج تهیه نمایید.

ه) بر حسب مساحت زیر پیک و یا ارتفاع و جرم پیک‌های به‌دست آمده از تزریق محلول‌های استاندارد، خط کالیبراسیون را به کمک نرم‌افزار Excel ترسیم کنید.

۷. برای اطمینان از درستی خط کالیبراسیون چند نمونه spike شده معین را آنالیز نمایید و برابری داده‌ها را بررسی نمایید.

آنالیز نمونه‌های مورد و استاندارد

۸. دستگاه HPLC-UV را بر اساس دستور روش تنظیم نمایید.

۹. ۳ میلی‌لیتر از محلول (بخش ۵) را به یک ویال ۴ میلی‌لیتری اضافه نمایید و ویال را درپوش گذاری کنید.

۱۰. ۲۰ میکرولیتر از نمونه آماده‌سازی شده را به دستگاه HPLC تزریق نمایید.

۱۱. سیگنال دستگاه را بر حسب ارتفاع پیک یا مساحت زیر پیک اندازه‌گیری نمایید.

نکات حائز اهمیت:

نکته ۱: اگر پیک نمونه مورد نظر بزرگتر از بزرگترین پیک استاندارد مشاهده شد، نمونه را یک یا دو بار رقیق‌سازی کرده و ضریب رقیق‌سازی را در محاسبات در نظر بگیرید.

---

[1] Spiked Sample

نکته ۲: موضوع شکست جذب سطحی را برای هر مجموعه از نمونه‌های محیط کار، به‌ویژه در غلظت‌های بالا از فرمالدئید در هوا، از طریق دو نمونه سری از کارتریج بررسی نمایید.

محاسبات غلظت نمونه‌های مورد

۱۲. جرم نمونه‌ها (W) بر حسب میکروگرم را به کمک فرمول خط کالیبراسیون محاسبه نمایید و سپس میانگین جرم نمونه‌های شاهد را محاسبه نمایید.

۱۳. غلظت نمونه‌های فرمالدئید در هوا را از طریق فرمول زیر و حجم هوای نمونه‌برداری تعیین نمایید.

$$C = \frac{W - B}{V}$$

که در آن:

C: غلظت بر حسب mg/m^3

W: جرم نمونه بر حسب mg

B: جرم شاهد بر حسب mg

V: حجم نمونه‌برداری بر حسب m^3

یادآوری:

$\mu g/L = mg/m^3$

۱ ppm = ۱.۲۳ mg/m^3 @ NTP

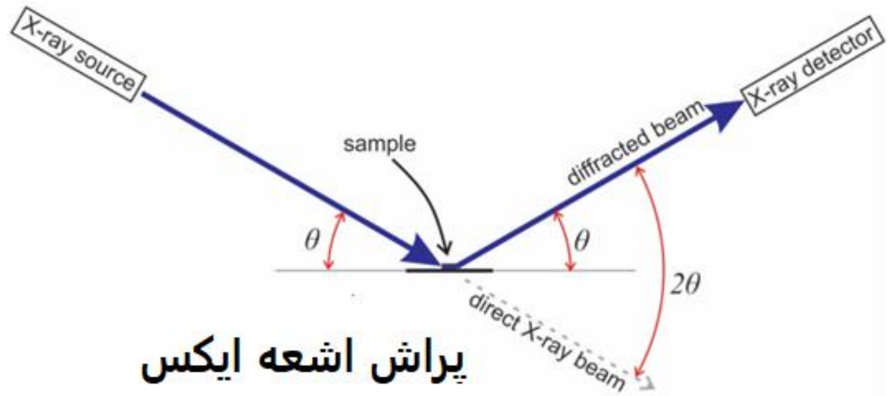
ارزشیابی روش

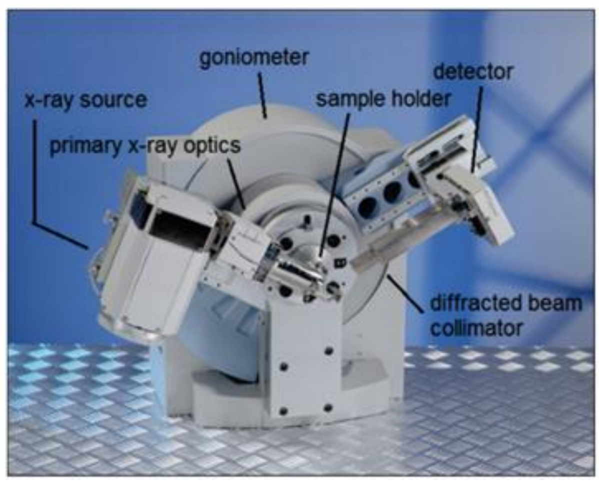
این روش در ابتدا با نمونه‌بردارهای Waters Sep-Pak XPoSure Aldehyde در سازمان NIOSH مورد بررسی قرار گرفت. بر اساس استانداردهای اتمسفریک در شرکت Waters، دقّت کلی به‌دست آمده بر اساس نظارت سازمان NIOSH در حدود ۰.۰۵۷ محاسبه گردید که شامل ۵٪ خطای پمپ و تورش ۴.۴٪ است. پایداری نمونه‌ها در دامنه ۰.۵ تا ۵۵ میکروگرم بر نمونه ارزشیابی گردید. میزان نمونه از دست رفته در دامنه ۴ الی ۸٪ برای ۱۴ روز در شرایط نگهداری در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد گزارش گردید.

در مطالعه دیگری که توسط شرکت Waters انجام شد، میزان نمونه تلف شده بعد از چهار روز نگهداری در دمای محیط معادل ۵٪ گزارش گردید. تمامی استانداردهای استفاده شده توسط شرکت Waters از نمونه‌های مایع ساخته شده از کمپلکس آلدئید-DNPH استخراج شده توسط محلول حلال استونیتریل تهیه و گزارش گردید.

ظرفیت نمونه‌بردارهای سیلکاژل پوشش داده شده با ترکیب DNPH بر اساس رطوبت نسبی هوا و غلظت فرمالدئید متغیر تشخیص داده شد. در غلظت ۱.۲ میلی‌گرم بر متر مکعب از فرمالدئید، شکست جذب سطحی در میزان ۵٪ گزارش شده است. ظرفیت جرمی نمونه‌بردارهای شرکت Waters در شرایط رطوبت نسبی کمتر از ۱۰٪ معادل ۵۵ میکروگرم و برای نمونه‌برداری در شرایط رطوبت نسبی بیشتر از ۸۵٪ معادل ۷۷ میکروگرم گزارش گردیده است.

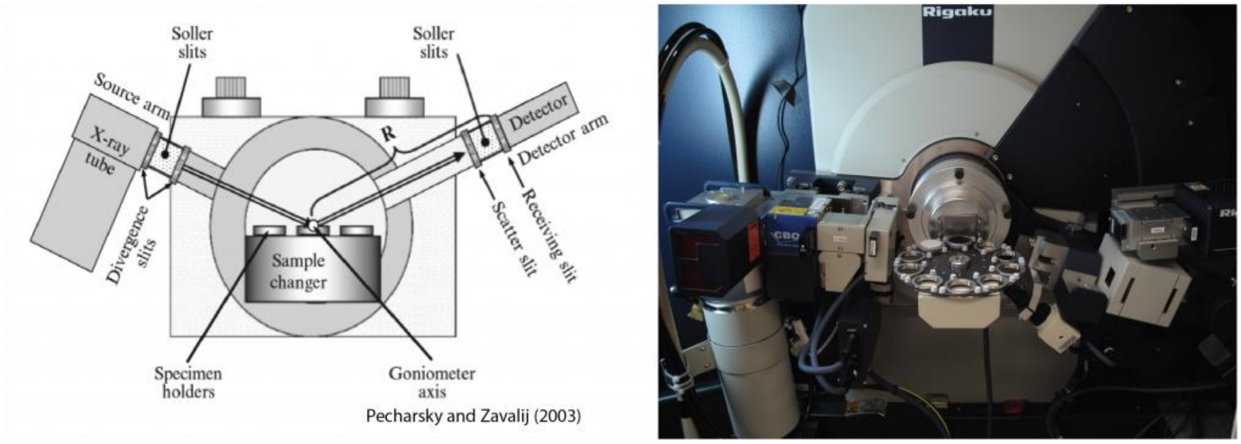
در غلظت ۲.۴ میلی‌گرم بر متر مکعب و رطوبت نسبی کمتر از ۱۰٪، شکست جذب سطحی برای نمونه‌بردارهای Waters با ظرفیت ۵۹ میکروگرم فرمالدئید معادل ۵٪ گزارش گردید. به همین منوال، در غلظت ۲.۶ میلی‌گرم بر متر مکعب و رطوبت نسبی بیشتر از ۸۵٪ و شکست جذب سطحی ۵٪، ظرفیت نمونه‌برداری ۱۰۶ میکروگرم گزارش شد.





۶-۱-۶) پراش اشعه ایکس

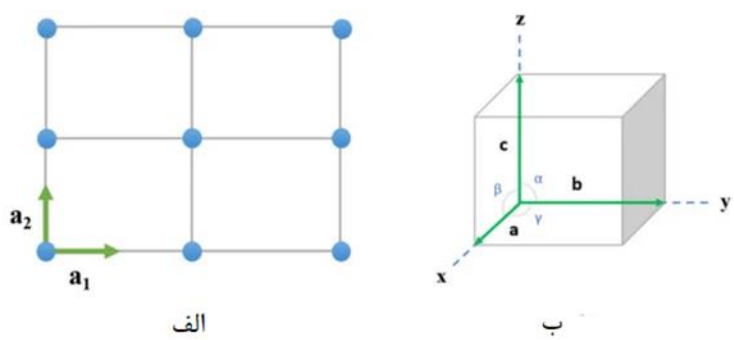
پراش اشعه ایکس (XRD) یک تکنیک غیرمخرب، مهم و پرکاربرد برای تشخیص کیفی و کمی مواد کریستالی از طریق شناسایی ساختار ترکیبات معدنی است. از همین رو، تکنیک XRD در برنامه‌های تحقیقاتی برای شناخت مواد معدنی نقش مهمی ایفا کرده و در دهه‌های اخیر این روش تشخیص پیوسته مورد توجّه پژوهشگران قرار گرفته است.



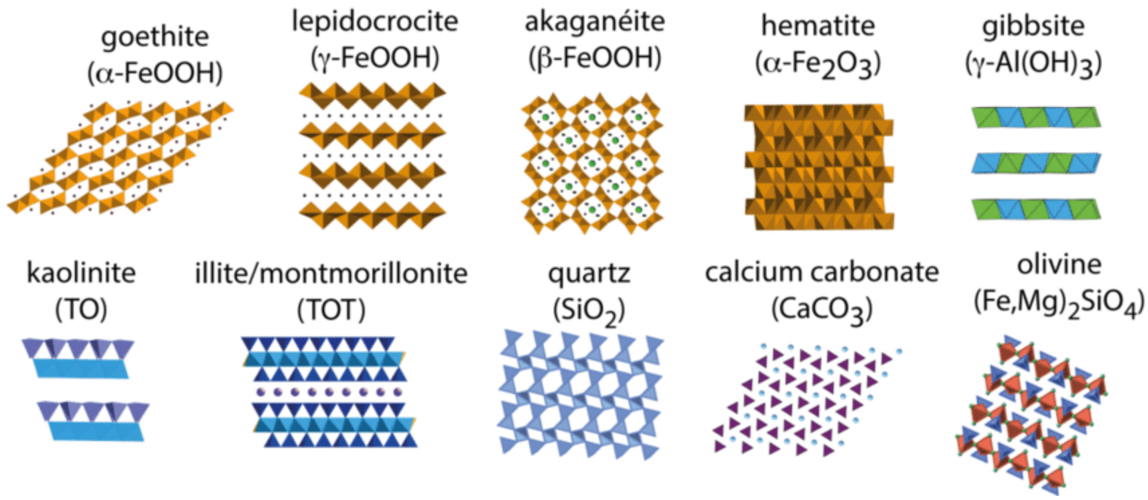
شکل ۷۲-۶) طرح شماتیک و تصویر واقعی از نمای درونی دستگاه XRD

۶-۱-۶-۱)   ساختارهای کریستالی

در یک آرایش کریستالی، اتم‌ها در یک الگوی تکراری و منظم در کنار یکدیگر چیده شده‌اند. کوچکترین عنصر تکرار شونده کریستال به عنوان سلول واحد شناخته می‌شود، در حالی که اندازه و شکل سلول واحد را می‌توان با زاویه بین محورهای (α، β، γ) و طول سه محور (a، b، c) توضیح داد (شکل ۷۳-۶). در یک سیستم سه‌بعدی، اتم‌ها در یک شبکه منظم بر اساس موقعیت آنها مرتب شده‌اند. ترکیبات معدنی موجود در طبیعت معمولاً در اشکال کریستالی دیده می‌شوند.



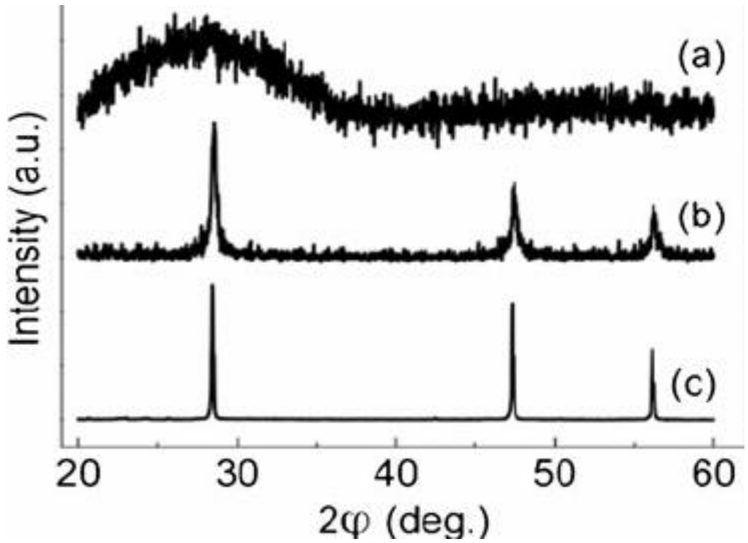
شکل ۷۳-۶) (الف) شبکه بلوری با بردار دو بعدی (ب) شبکه بلوری با بردار سه بعدی



شکل ۷۴-۶) ساختار کریستالی برخی از ترکیبات معدنی

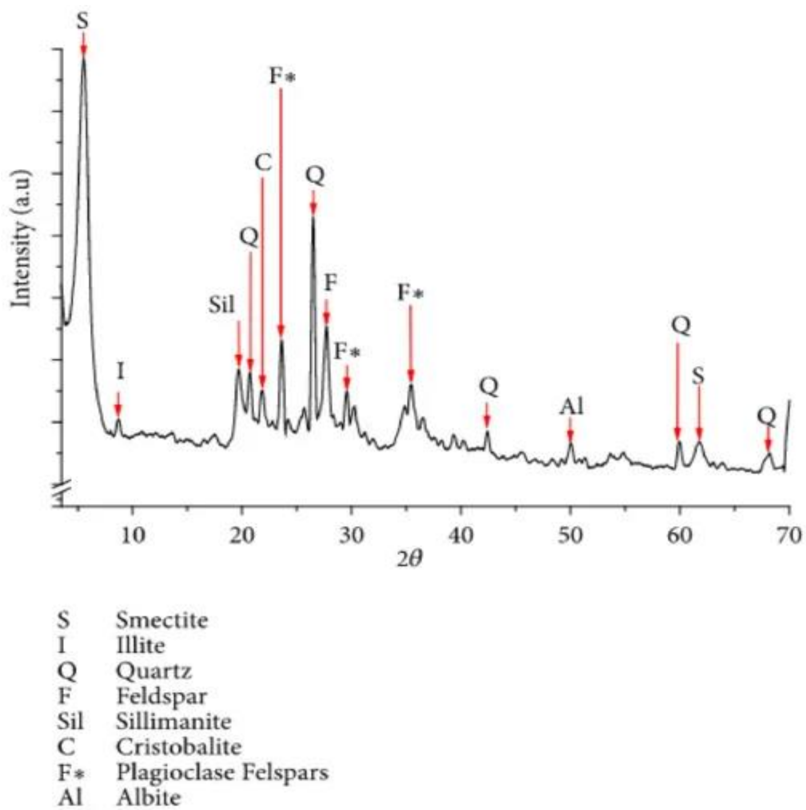
۶-۱-۶-۲) اصول پراش اشعه ایکس و اندازه‌گیری کریستال‌های معدنی

هنگامی که اشعه ایکس به مواد جامد برخورد می‌کند، توسط الکترون‌های در حال گردش در اطراف هسته اتم‌ها پراکنده می‌شود. این امواج پراکنده که در جهات مختلف ساطع می‌شوند، با یکدیگر تداخل دارند. ماهیت تداخل بر اساس جهت و نوع برهم‌کنش امواج می‌تواند سازنده یا مخرب باشد. پراش اشعه ایکس از نوع تداخل سازنده، به دلیل آرایش منظم (تناوبی) ساختارهای اتمی منحصر به‌فرد برای ترکیبات کریستالی است. از این رو، نمودارهای پراش اشعه ایکس هر ماده کریستالی منحصر به‌فرد است. نمودار XRD برای ترکیبات غیرکریستالی (جامدات آمورف) و ترکیبات کریستالی (جامدات پلی‌مورف) در شکل ۷۵-۶ نشان داده شده است. به دلیل عدم وجود آرایش تناوبی در مواد معدنی آمورف، نمودار پراش اشعه ایکس فقط به صورت یک پیک در یک زاویه پراش مشخص نشان داده می‌شود، در حالی که در مواد پلی‌مورف، چندین پیک متمایز به دلیل آرایش تناوبی اتم‌ها نمایان می‌گردد.



شکل ۷۵-۶) تصویری از سه پراش اشعه ایکس ترکیبات a) کلوئید سیلیس غیرکریستالی، b) کلوئید سیلیس کریستالی و c) پودر سیلیس کریستالی

(**Ref: Shabir Q, Pokale A, Loni A, Johnson DR, Canham LT, Fenollosa R, Tymczenko M, Rodriguez I, Meseguer F, Cros A, Cantarero A. Medically biodegradable hydrogenated amorphous silicon microspheres. Silicon. 2011;3:173-6.**)

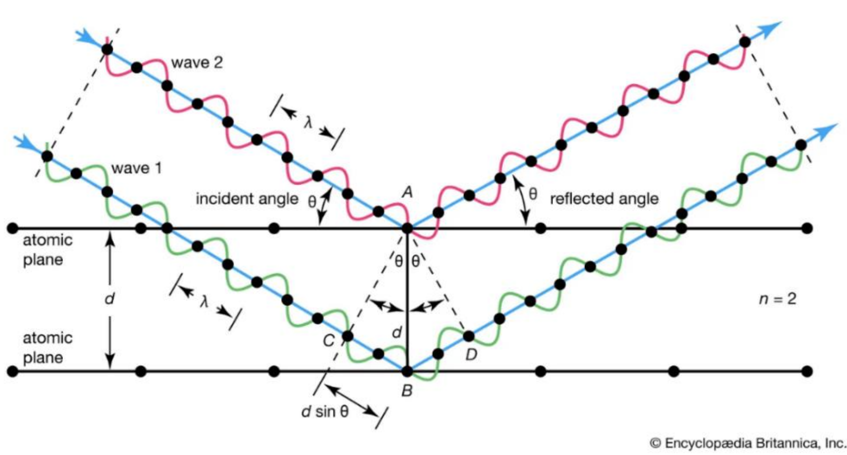


شکل ۷۶-۶) تصویری از پراش اشعه ایکس برای خاک رس و انواع مواد معدنی کریستالی تشکیل دهنده آن

تشخیص ترکیب از طریق پراش اشعه ایکس در زاویه 2Θ (طول موج خاص مشخصه کیفی ترکیب کریستالی) انجام می‌شود. از این رو پراش تک‌فام اشعه ایکس و شدت آن، مبنای تجزیه کیفی و کمّی ترکیبات کریستالی است. برای مثال اجزای ترکیبات کریستالی خاک رس به‌صورت کیفی با توجّه به زاویه پراش ۲Θ در شکل ۷۶-۶ نشان داده شده است. با توجّه به اهمیت دستگاه آنالیز XRD، ارائه توضیحات بیشتر در مورد برخی از مفاهیم فیزیکی و جزئیات روش آنالیز XRD در ادامه شرح داده می‌شود.

۶-۱-۶-۳) قانون براگ

پراش اشعه ایکس توسط Laue کشف شد. پس از او، یک روش اندازه‌گیری ترکیبات کریستالی با استفاده از پرتو تک‌فام X توسط Bragg ارائه شد. بر اساس نظریه Bragg، ترکیبات کریستالی دارای صفحات چند لایه‌ای فرض می‌شوند که فاصله بین صفحاتی را که با حروف لاتین نشانه‌گذاری می‌شود، با حرف d نمایش می‌دهند (شکل ۶-۷۷). برخورد پرتو X در این صفحات اتمی بازتاب یا پراش ایجاد می‌کند. در صفحات شبکه‌های کریستالی، دو زاویه بین پرتو فرودی X و موج پراش آن با هم برابر خواهد بود. از آنجایی که پراش در ساختارهای کریستالی از نوع تداخل سازنده است، بنابراین فاصله دو سطح از ترکیب کریستالی برابر با d است و پراش بر اساس قانون Bragg به‌شرح زیر مطرح می‌گردد.



شکل ۷۷-۶) پراش اشعه ایکس و نوع برهمکنش امواج به‌صورت سازنده

امواج ۱ و ۲ در شکل ۷۷-۶ دارای فاز سازنده با یکدیگر هستند که به سطح اتم‌های کریستالی A و B با فاصله d بین صفحات اتمی خود برخورد می‌نمایند. زاویه بازتابی، همانطور که در شکل نشان داده شده است، برابر با زاویه برخورد θ است. شرط ماندن دو موج پس از بازتاب به‌صورت فاز سازنده این است که طول مسیر CBD برابر با حاصلضرب طول موج (λ) در عدد صحیح (n) باشد. در محاسبات هندسی، CB و BD برابر با یکدیگر و برابر با d sin θ (d بین دو سطح از کریستال و سینوس زاویه بازتاب شده θ) هستند. از این‌رو قانون براگ به‌صورت nλ = 2d sin θ، ارائه می‌شود.

۶-۱-۶-۴) اجزای دستگاه XRD

دستگاه XRD از سه بخش اصلی منبع مولد پرتو X، پایه نگهدارنده نمونه و آشکارساز تشکیل شده است.

۶-۱-۶-۴-۱) منبع پرتو X در دستگاه XRD

پرتو ایکس در سال ۱۸۹۵ توسط فیزیکدان آلمانی به نام رونتگن کشف شد. از پرتو ایکس برای ساختن تصاویری از ساختار داخلی اجسام استفاده می‌شود. پرتو ایکس بخشی از طیف امواج الکترومغناطیسی است که از بمباران مواد با الکترون‌های شتاب داده شده ایجاد می‌شود. پرتو ایکس دارای طول موج‌هایی کوتاه‌تر از پرتو UV و بزرگ‌تر از پرتو گاما است و طول موجی در دامنه ۰.۰۱ تا ۱۰ نانومتر دارد.

پراش اشعه ایکس بر اساس تداخل سازنده پرتو تک‌فام ایکس توسط ترکیبات کریستالی اتفاق می‌افتد. پرتو ایکس توسط یک لامپ کاتدی تولید می‌شود و سپس برای تولید اشعه تک‌فام فیلتر شده و از طریق سیستم اپتیک به سمت نمونه هدایت می‌شود.

۶-۱-۶-۴-۲) پایه نگهدارنده نمونه

پایه نگهدارنده نمونه جایگاهی در دستگاه XRD است که در آن نمونه‌های ذرات به شکل پودری و اندازه‌های میکرونی، در حجم چند میلی‌گرم، بر روی فیلتر غشای نقره‌ای مستقر بر روی پایه مخصوص قرار داده می‌شود.

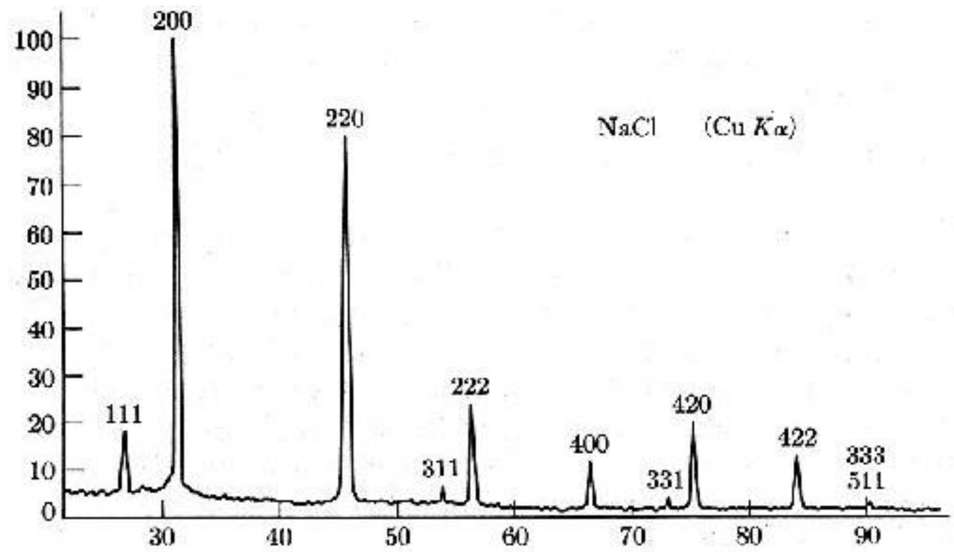
۶-۱-۶-۴-۳) آشکارساز دستگاه XRD

آشکارساز دستگاه XRD برای شناسایی نمونه‌های حاوی مواد کریستالی استفاده می‌گردد. بر اساس روش OSHA-142، نمونه‌های گرفته شده از منطقه تنفسی کارگران ترجیحاً در اندازه حدود ۱۰ میکرون (یا اندازه مش ۲۰۰) و در حجم ۳ میلی‌گرم بر روی فیلتر غشای نقره‌ای آماده‌سازی شده و سپس بر روی پایه دستگاه XRD قرار داده می‌شود، به ترتیبی که منبع پرتو X و آشکارساز بر روی نمونه متمرکز شوند. عملکرد دستگاه XRD بدین صورت است که پرتو X در زوایای مختلف (θ) به پودر ترکیبات کریستالی تابیده می‌شود. در اثر این تابش و برخورد پرتو به اتم‌ها، اشعه بازتاب و یا اصطلاحاً پراش ایجاد می‌شود. بازتابش پرتو XRD از اصل پراکندگی رایلی[۱] پیروی می‌کند که بر اساس آن، فرکانس پرتو تابیده با پرتو ناشی از پراش آن برابر می‌باشد.

۶-۱-۶-۵) نمایش عملکرد XRD

شکل ۶-۷۸ تصویری از آنالیز نمونه بلور NaCl را توسط دستگاه XRD نشان می‌دهد. همانطوری‌که در این شکل مشاهده می‌شود، با توجّه به ساختار بلوری ترکیب، پراش اشعه ایکس به‌صورت ۲Θ (محور افقی) در زاوایای متعددی می‌تواند اندازه‌گیری شود که مشخصه بلور NaCl است و شدت پراش نماینده تراکم بلور در محور عمودی خواهد بود. لازم به‌ذکر است که بهترین زاویه ۲Θ مبنای اندازه‌گیری قرار داده می‌شود که بر اساس بیشترین شدت پراش در اغلب اوقات انتخاب می‌گردد.

---
[1] Rayleigh scattering



شکل ۷۸-۶) پراش اشعه X برای کریستال NaCl در زوایای مختلف ۲Θ برای تشخیص کیفی و کمّی ترکیب

۶-۱-۶-۶) کارایی دستگاه XRD

این سیستم آنالیز دستگاهی یک روش کارآمد برای تشخیص ترکیبات کریستالی از ترکیبات غیرکریستالی است. این شکل، تشریح‌کننده پراش یک ترکیب در دو وضعیت کریستالی و غیرکریستالی می‌باشد.

به‌طور کلی این روش در آزمایشگاه‌های آلودگی هوا به عنوان روش استاندارد طلایی توسط سازمان‌های OSHA و NIOSH معرفی شده است. لازم به‌ذکر است که روش آنالیز XRD علی‌رغم تشخیص سریع ترکیبات بلوری مجهول و تفسیر ساده داده‌های روش، دارای نکات ضعیفی از قبیل تداخل اندازه دانه‌بندی ذرات پودر شده ترکیب بر کیفیت پراش اشعه ایکس است. از این‌رو برای برخورداری از یک نتیجه قابل قبول، توصیه شده است که دانه‌بندی ذرات در دامنه ۰.۵ تا ۵۰ میکرومتر باشد. لازم به‌ذکر است که در صورت آماده‌سازی نمونه و انجام آسیاب بیش از حد نمونه، پیک‌های به‌دست آمده در زاویه Θ2 از کیفیت مناسب برای تشخیص برخوردار نخواهند بود.

۶-۱-۶-۷) کاربرد روش آنالیز دستگاهی XRD در رشته مهندسی بهداشت حرفه‌ای

بر اساس تشخیص سازمان‌های NIOSH و OSHA، روش XRD بهترین روش برای آنالیز کمّی و کیفی ترکیبات سیلیس و سایر ترکیبات کریستالی است، ولی به علت گرانی دستگاه و هزینه‌های زیاد مواد مصرفی کمتر مورد استقبال پژوهشگران کشور قرار گرفته است. در یک پروژه تحقیقاتی برای تشخیص نهایی سیلیس کریستالی در گرد و غبار فعالیت ساختمانی از روش XRD بهره گرفته شد. در پروژه‌های پژوهشی دیگر نیز روش آنالیز دستگاهی XRD برای تشخیص درصد خلوص سیلیس کریستالی در یک مطالعه سم‌شناسی بر رده سلولی A549 به‌صورت برون‌تنی استفاده گردید.

در یک مطالعه دیگر، درصد خلوص کوارتز خریداری شده از شرکت مرک آلمان به منظور تهیه منحنی استاندارد سیلیس کریستالی در روش ۷۶۰۲ سازمان NIOSH برای تعیین میزان مواجهه شغلی کارگران واحد ماهیچه‌گیری و مواجهه با گرد و غبار سیلیس کریستالی تنفسی مورد استفاده قرار گرفت.

در یک پروژه تحقیقاتی دیگر با عنوان "نهادینه‌سازی روش بهینه‌سازی شمارش الیاف آزبست به روش میکروسکوپی PCM"، نیز تشخیص کیفیت مواد آزبست دریافتی از یکی از دانشگاه‌های ایران توسط روش XRD مورد بررسی قرار گرفت.

۶-۱-۶-۸) آنالیز سیلیس کریستالی به روش پراش اشعه ایکس

همان‌طور که پیش‌تر گفته شد، دو روش استاندارد نمونه‌برداری و آنالیز دستگاهی XRD به شماره‌های ۷۵۰۰ NIOSH و OSHA ID-142 برای سیلیس کریستالی کوارتز و کریستوبالیت وجود دارد که در این بخش خلاصه‌ای از یک روش آنالیز سیلیس کریستالی با اقتباس از دو روش فوق به‌شرح زیر گزارش می‌گردد:

نمونه‌بردار

سیکلون‌های ۱۰ میلی‌متری nylon cyclone، Higgins-Dewell (HD) cyclone و یا سیکلون آلومینیومی مجهز به فیلتر غشایی PVC با پورسایز ۵ میکرومتر

گذر حجمی نمونه‌برداری

گذر حجمی بر اساس نوع سیکلون انتخاب می‌گردد. گذر حجمی برای سیکلون نایلونی، سیکلون HD و سیکلون آلومینیومی به‌ترتیب معادل ۱.۷، ۲.۲ و ۲.۵ لیتر در دقیقه در نظر گرفته می‌شود (سیکلون‌های جدید شرکت SKC نیازمند گذر حجمی ۳.۵ لیتر در دقیقه هستند).

حجم

حجم کمینه: ۴۰۰ لیتر

حجم بیشینه: ۱۰۰۰ لیتر

نحوه ارسال نمونه

شرایط دمای خاصی نیاز ندارد و کاست سیکلون باید در شرایط بسته‌بندی مناسب برای حفظ نمونه تحویل داده شود.

پایداری نمونه

نمونه در شرایط حرارت محیطی پایدار است.

تعداد نمونه شاهد

۲ الی ۱۰ نمونه شاهد برای هر سری از نمونه‌های مورد

اندازه‌گیری میزان سیلیس کریستالی

روش آنالیز: دستگاه آنالیز پراش پرتو ایکس

ترکیب مورد نظر برای آنالیز: سیلیس کریستالی[۱] شامل کوآرتز کریستوبالیت[۲] و تیریدیمیت[۳]

آماده‌سازی نمونه مرحله نخست: کاربرد دستگاه کوره حرارتی (برقی و یا پلاسما) برای سوزاندن فیلتر و یا استفاده از حلال تتراهیدروفوران[۴] برای حل نمودن فیلتر

آماده‌سازی مرحله دوم: انتقال سیلیس کریستالی از مرتبه قبل به فیلتر غشاء نقره‌ای از طریق فیلتر نمودن ذرات نمونه‌برداری توسط حلال ۲-پروپانول[۵]

---

[1] Crystalline SiO_2
[2] Quartz Cristobalite
[3] Tridymite
[4] tetrahydrofuran
[5] 2-propanol

دستگاه XRD: کاربرد دستگاه پراش سنج پودر اشعه ایکس دارای تک‌فام ساز با قابلیت جداسازی در حد 1° برای طول موج و آشکارساز اشعه ایکس

نمونه‌های استاندارد جهت کالیبراسیون دستگاه باید از موسسه ملی استانداردها و تکنولوژی کشور آمریکا (NIST) دریافت شوند و محلول‌های استاندارد در حلال ۲-پروپانول ساخته شوند.

دامنه استانداردهای مورد نیاز روش آنالیز: ۰.۰۲ تا ۲ میلی‌گرم بر نمونه

LOD تخمینی در این روش: ۰.۰۰۵ میلی‌گرم بر نمونه

تکرارپذیری روش: ۰.۰۸ در دامنه ۰.۰۵ تا ۰.۲ میلی‌گرم بر نمونه

خلاصه‌ای از روش آماده‌سازی نمونه و آنالیز توسط دستگاه XRD

۱. پس از سوزاندن فیلتر یا حل نمودن آن در حلال تتراهیدروفوران (THF)، ذرات کریستالی نمونه در حلال ۲-پروپانول و با استفاده از سیستم فراصوت به‌صورت سوسپانسیون در می‌آید. ذرات معلق در نمونه از طریق فیلتراسیون بر روی یک فیلتر غشایی نقره‌ای جمع‌آوری می‌شود و سپس بر روی پایه دستگاه XRD برای آنالیز قرار داده می‌شود.

۲. در مرحله بعد دستگاه XRD برای تنظیم زوایای پراش اشعه ایکس (2Θ) برای ترکیبات سیلیس کریستالی به‌شرح زیر تنظیم می‌شود.

جدول ۱۹-۶) زوایای 2Θ برای پراش ترکیبات سیلیس کریستالی

سیلیس کریستالی	زاویه پراش نخستین (درجه)	زاویه پراش دومی (درجه)	زاویه پراش سومی (درجه)
Quartz	۲۶.۶۶	۲۰.۵۰	۵۰.۱۶
Cristobalite	۲۱.۹۳	۳۶.۱۱	۳۱.۴۶
Tridymite	۲۱.۶۲	۲۰.۵۰	۲۳.۲۸
Silver*	۳۸.۱۲	۲۴.۲۸	۷۷.۴۷

* مشخصات پراش اشعه ایکس

۳. مولد اشعه ایکس در دستگاه XRD بر روی ۴۰ کیلو ولت و ۴۰ میلی‌آمپر (یا حداکثر تنظیمات مناسب برای دستگاه) تنظیم می‌شود. با استفاده از انبرک، یک استاندارد را از ظرف پتری به روی نگهدارنده یا پایه نمونه منتقل کنید. پس از

مستقر نمودن نمونه بر روی پایه یا نگهدارنده، دریچه سیستم بسته می‌شود و سیستم محرکه نمونه برای تنظیم زوایای 2Θ فعال‌سازی می‌شود.

۴. خط کالیبراسیون نمونه‌های استاندارد در دامنه ۰.۰۵ تا ۱۶۰ میکروگرم بر نمونه و بر حسب شدت پراش نمونه در زاویه 2Θ محاسبه می‌شود.

۵. محاسبه تراکم نمونه گرد و غبار سیلیس کریستالی در هوای تنفسی کارکنان با استفاده از فرمول زیر محاسبه می‌شود:

$$C = w\ (\mu g)/V\ \mathrm{m}^3$$

که در آن:

V= حجم نمونه بر حسب m^3

W= وزن نمونه بر حسب µg

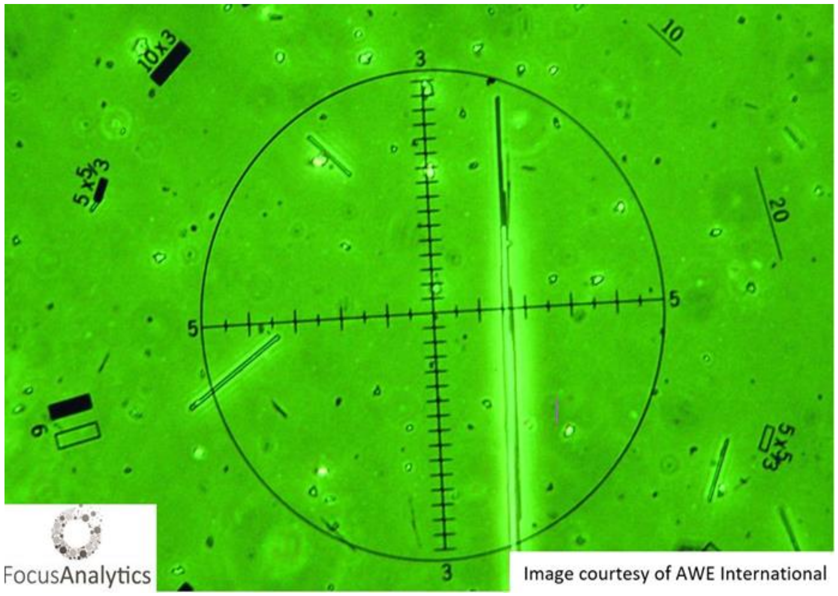
۶. نکات قوت روش XRD:

- **روش XRD توانایی لازم برای تشخیص کوارتز و کریستوبالیت را دارد و می‌تواند ساختار کریستالی آنها را تشخیص دهد.**
- **آماده‌سازی نمونه ساده است و تجزیه و تحلیل را می‌توان با کامپیوتر کنترل و خودکار کرد.**
- **آماده‌سازی و تجزیه و تحلیل نمونه شامل یک تکنیک غیر مخرب است. نمونه‌ها می‌توانند مجدداً مورد تجزیه و تحلیل قرار گیرند.**
- **کوارتز و کریستوبالیت را می‌توان در سه یا چند زاویه مختلف پراش شناسایی نمود و این زوایای پراش مشخصه این ترکیبات محسوب می‌شوند.**
- **عوامل مداخله‌کننده را می‌توان با استفاده از زوایای پراش جایگزین به کمک کامپیوتر به حداقل رساند.**
- **این روش آنالیز دقیق‌تر و دارای حساسیت بهتری نسبت به روش‌های قبلی است.**
- **این روش آنالیز عنصری نیست و مختص ترکیبات کریستالی است. پراش اشعه ایکس (XRD) در طول موج‌های مختلف، ویژه این ترکیبات می‌باشد. همچنین، روش XRD در شرایطی می‌تواند به عنوان یک روش تکمیلی برای آنالیز ترکیبات دیگر نیز به کار رود.**

۷. نکات ضعف روش XRD:

- **هزینه بالای آنالیز با این روش به دلیل استفاده از ابزار دقیق و نیاز به نگهداری سیستم پیچیده، از مشکلات کاربرد گسترده آن است.**

- **یکی دیگر از مشکلات روش XRD، الزام به شناخت توزیع دانه‌بندی ذرات در نمونه‌ها است. همچنین، وزن نمونه‌های مورد استفاده باید با نمونه‌های شاهد برای آنالیز در این روش سازگار باشد تا دقت آن تأمین گردد.**



۶–۱–۷)   شمارش الیاف آزبست توسط میکروسکوپ فاز کنتراست

الیاف معدنی دسته‌ای از مواد کانی هستند که به‌طور طبیعی در لایه‌های زمین یافت می‌شوند. آزبست یکی از این الیاف معدنی است که به استحکام، دوام و مقاومت در برابر آتش و آب شناخته شده است. در بیشتر دوران‌های قرن بیستم، آزبست به‌طور گسترده‌ای برای مصارف مختلف استفاده می‌شد. الیاف آزبست انعطاف‌پذیر و قابل ارتجاع بوده و ماندگاری بالایی دارند و می‌توانند به‌صورت پارچه بافته شوند.

۶–۱–۷–۱)   الیاف معدنی آزبست

الیاف مختلف آزبست به طور سنتی برای عایق‌کاری حرارتی در قرن نوزدهم و بیستم مورد استفاده می‌گرفته است. در گذشته مواد حاوی آزبست در مخلوط با اجزای ساختمانی مانند گچ دیوار، کاشی‌های کف و سقف و مصالح سقف به‌عنوان عایق حرارتی و صوتی استفاده می‌شده است. امّا در حال حاضر مصالح ساختمانی می‌بایست

فاقد آزبست باشند. الیاف آزبست دارای اقسام مختلفی شامل کریزوتیل[1]، کروسیدولیت[2]، آموزیت[3]، کومینگتونیت-گرونریت[4]، ترمولیت[5]، اکتینولیت[6] و آنتوفیلیت[7] می‌باشد. کاربرد و خصوصیات اقسام الیاف آزبست در ادامه مطرح می‌شود.

کریزوتیل با فرمول شیمیایی $Mg_3Si_2O_5(OH)_4$ پرکاربردترین و رایج‌ترین نوع آزبست است (شکل ۷۹-۶). امروزه می‌توان آزبست را در سقف‌ها، پشت‌بام‌ها، دیوارها، کف خانه‌ها و مراکز تجاری برای عایق‌کاری پیدا کرد. سازندگان همچنین از آزبست کریزوتیل در ساخت لنت‌های ترمز خودرو، واشر و مهر و موم دیگ بخار و عایق لوله‌ها، مجاری و لوازم خانگی استفاده می‌کردند. لازم به‌ذکر است که کاربرد الیاف آزبست در سطح جهانی و در کشور ایران ممنوع شده است، اما هنوز به‌صورت گاه‌به‌گاه استفاده می‌شود.



شکل ۷۹-۶) الیاف معدنی کریزوتیل

آزبست آموسیت $(Mg, Fe^{+2})_7Si_8O_{22}(OH)_2$ برای ساخت بلوک‌های سیمانی، عایق‌کاری لوله‌ها، پوشش‌های سقفی و عایق‌های حرارتی استفاده می‌گردید (شکل ۸۰-۶).

[1] chrysotile
[2] crocidolite
[3] amosite
[4] cummingtonite-grunerite
[5] tremolite
[6] actinolite
[7] anthophyllite



شکل ۸۰-۶) الیاف معدنی آموسیت

آزبست کروسیدولیت $Na_2Fe_2^{3+}(Fe^{2+}, Mg)_3Si_8O_{22}(OH)_2$ یا آزبست آبی به‌طور سنتی برای عایق‌کاری ماشین‌های بخار استفاده می‌گردید. این نوع آزبست با اسپری همراه چسب برای عایق‌کاری لوله‌ها، پلاستیک و محصولات سیمان نیز کاربرد دارد (شکل ۸۱-۶).



شکل ۸۱-۶) الیاف معدنی کروسیدولیت

آزبست آنتوفیلیت $(Mg, Fe^{2+})_7Si_8O_{22}(OH)_2$ در مقادیر محدود در محصولات عایق‌کاری و ساختمانی استفاده می‌شود. این نوع آزبست همچنین به‌عنوان ناخالصی در آزبست کریزوتیل و آزبست ورمیکولیت[۱] و پودر تالک یافت

[1] vermiculite

می‌شود. این نوع آزبست ممکن است در رنگ‌های خاکستری، سبز-خاکستری و یا سفید نیز دیده شود (شکل ۸۲-۶).



شکل ۸۲-۶) الیاف معدنی آنتوفیلیت

آزبست ترمولیت و اکتینولیت $Ca_2(Mg, Fe)_5Si_8O_{22}(OH)_2$ به‌صورت تجاری استفاده نمی‌شود امّا به‌عنوان ناخالصی در آزبست کریزوتیل، ورمیکولیت و پودر تالک دیده می‌شود. این دو نوع آزبست می‌تواند به رنگ‌های قهوه‌ای، سبز، خاکستری و شفاف دیده شوند (شکل ۸۳-۶).



شکل ۸۳-۶) الیاف معدنی ترمولیت و اکتینولیت

۶-۱-۷-۲) خطرات بالقوه الیاف آزبست برای سلامت انسان

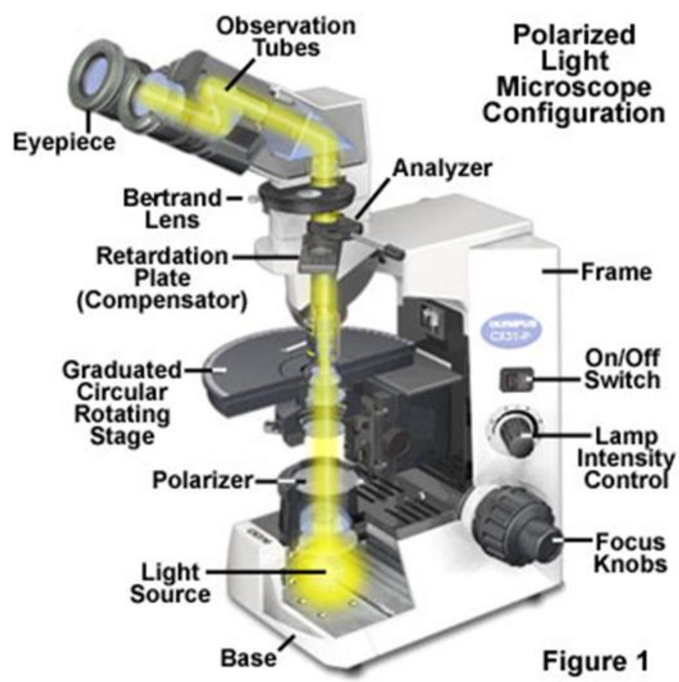
برخی از انواع آزبست ممکن است خطرناک‌تر از سایر انواع دیگر باشند، امّا همه آنها برای سلامت مشکل‌آفرین هستند. آژانس‌های بهداشت و رفاه کشور آمریکا، سازمان EPA و آژانس IARC وابسته به سازمان WHO، همه اقسام الیاف آزبست را به عنوان عوامل سرطان‌زای تائید شده انسانی (گروه ۱) طبقه‌بندی نموده‌اند. تمام اقسام الیاف شناسایی شده آزبست می‌توانند باعث آزبستوزیس[1]، مزوتلیومای بدخیم[2]، سرطان ریه[3]، سرطان تخمدان[4]، سرطان حنجره[5] و سایر بیماری‌های جدی شوند.

برخی از سازمان‌های بین‌المللی از جمله سازمان سلامت، ایمنی و محیط‌زیست در بریتانیا (HSE)، ادعا می‌کنند که انواع آزبست‌های گروه آمفیبولی (کروسیدولیت، آموزیت، کومینگتونیت-گرونریت، ترمولیت، اکتینولیت و آنتوفیلیت)، خطرناک‌تر از نوع آزبست کریزوتیل از گروه سرپنتین[6] هستند. سازمان EPA پروژه‌های خود را با هدف شناسایی سمی‌ترین نوع الیاف آزبست رها کرده است، زیرا کنترل تمامی اقسام الیاف آزبست از اولویت مهم‌تری برخوردار است. لازم به‌ذکر است که سازمان EPA آمریکا و ۵۰ کشور دیگر از سال ۱۹۸۶ کاربرد انواع مختلف آزبست را ممنوع اعلام کرده‌اند و وزارت بهداشت ایران نیز در دهه ۸۰ شمسی کاربرد آزبست را ممنوع اعلام نمود. علی‌رغم ممنوعیت کاربرد آزبست، هنوز مشکل مواجهه شغلی کارگران با الیاف آزبست در محیط‌های ساختمانی و صنعتی کشورهای مختلف وجود دارد، زیرا آزبست در اماکن و ماشین‌آلات مختلف یافت می‌شود و همچنین تخلفاتی در زمینه واردات الیاف آزبست مشاهده می‌شود. به همین دلیل، پایش شغلی کارگران با الیاف آزبست همچنان اهمیت دارد و روش‌های استاندارد در این زمینه توسط سازمان‌های NIOSH و OSHA ارائه شده است.

---
[1] asbestosis
[2] malignant mesothelioma
[3] lung cancer
[4] ovarian cancer
[5] laryngeal cancer
[6] Serpentine

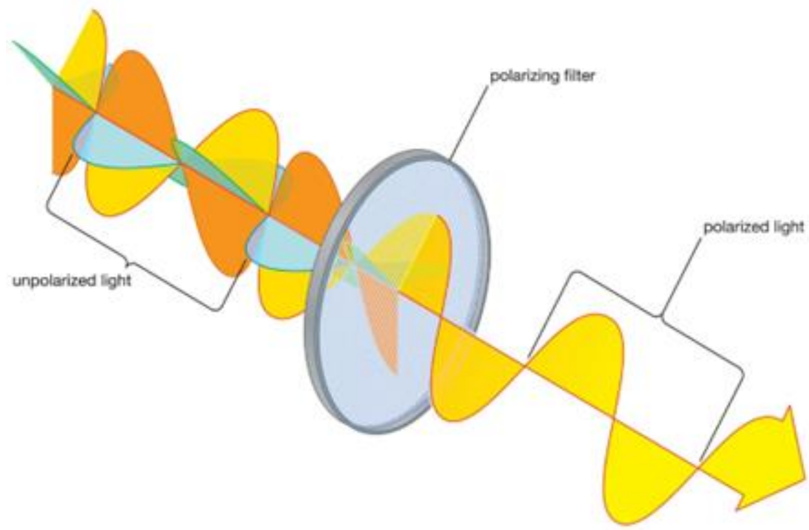
۶-۱-۷-۳) روش‌های نمونه‌برداری و آنالیز الیاف آزبست

- نمونه‌برداری و آنالیز الیاف آزبست می‌تواند از طریق میکروسکوپ‌های مختلف انجام شود که میکروسکوپ نور پلاریزه[۱] به‌عنوان یکی از نخستین روش‌های پذیرفته شده توسط EPA برای تجزیه کیفی مصالح ساختمانی با محتوای آزبست پذیرفته شده بود. با استفاده از میکروسکوپ نور پلاریزه، کارشناسان خواص نوری اجزای الیاف آزبست و الیاف شیشه‌ای[۲] نمونه‌ها را آزمایش می‌کنند و با توجّه به پلاریزه نمودن نور، نوع آزبست و درصد تخمینی آن در نمونه‌های توده‌ای اندازه‌گیری می‌شود.



شکل ۸۴-۶) میکروسکوپ نور پلاریزه

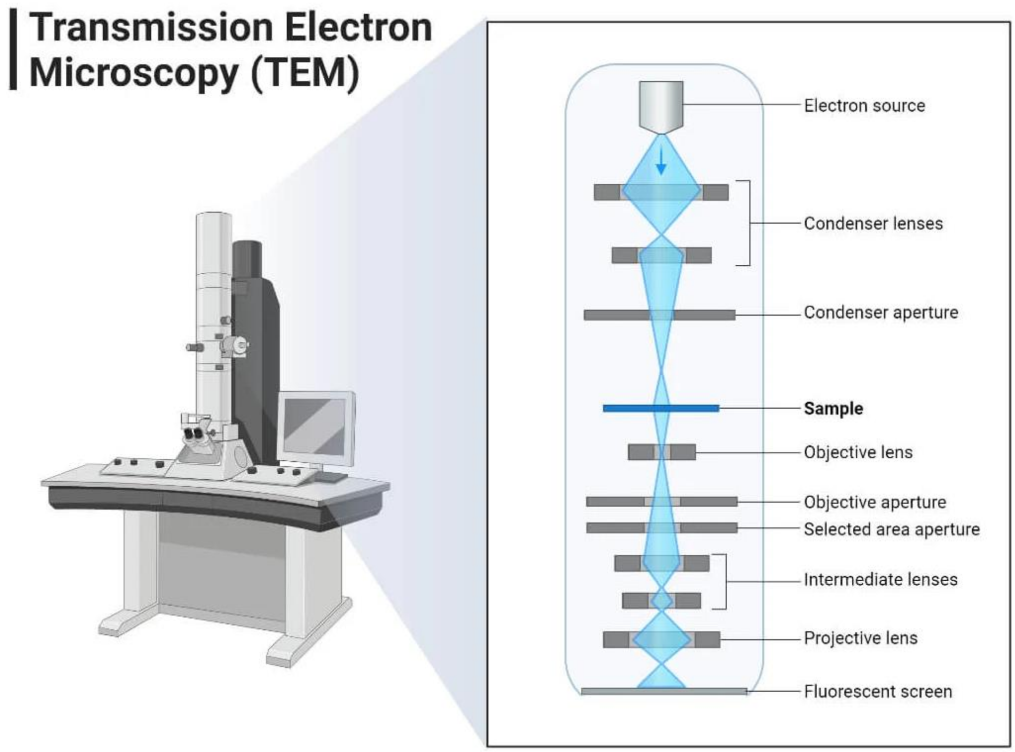
[1] Polarized Light Microscopy
[2] Vitreous Fibers



شکل ۸۵-۶) فرایند چگونگی پلاریزه شدن نور فرابنفش و مرئی

- میکروسکوپ الکترونی انتقالی (TEM)[1] نیز برای تشخیص الیاف آزبست استفاده می‌شود که توسط سازمان EPA آمریکا برای تائید غلظت‌های پایین از الیاف آزبست (با طول کمتر از ۰.۵ میکرومتر و عرض ۰.۰۱ میکرومتر) در مواد ساختمانی فله‌ای توصیه شده است. این روش در درجه اول برای بررسی درجه پاکسازی نهایی منطقه تخلیه شده از آزبست، مانند مدارس دولتی، استفاده می‌شود.

[1] Transmission Electron Microscopy



شکل ۸۶-۶) میکروسکوپ الکترونی انتقالی

در میکروسکوپ TEM، پرتو الکترونی از یک نمونه بسیار نازک (۱۰۰ نانومتر) عبور می‌کند و با گذر الکترون از نمونه، با آن واکنش می‌دهد. دو ویژگی مهم TEM، وضوح فضایی جانبی بالای آن و توانایی آن در ارائه تصویر و پراش نمونه است. این تکنیک برای تشخیص کامل مورفولوژیکی، کریستالوگرافی، آنالیز ساختار اتمی (ترکیب شیمیایی، پیوند)، ساختار الکترونیکی و هماهنگی ساختار اتمی نمونه‌ها استفاده می‌شود. نمایش شماتیک اجزای TEM در شکل ۸۶-۶ نشان داده شده است.

- میکروسکوپ فاز کنتراست (PCM)[1] رایج‌ترین روش مورد استفاده برای آنالیز آزبست هوابرد و الیاف مصنوعی شیشه‌ای[2] است. میکروسکوپ PCM برای شمارش الیاف موجود بر روی کاست فیلتر به‌کار می‌رود تا مشخص

[1] Phase Contrast Microscope

[2] Synthetic Vitrous Fibers

گردد که غلظت کل الیاف آزبست کمتر از استاندارد EPA باشد که برای شهرک‌های مجاور مناطق صنعتی و یا مواجهه شغلی کارگران به‌ترتیب معادل fiber/ml ۰.۰۱ و fiber/ml ۰.۱ می‌باشد.

شمارش الیاف آزبست به روش PCM برای نمونه‌های مواجهه فردی با هد فیلتر دالانی به ارتفاع ۵۰ میلی‌متر مجهز به فیلتر استر سلولزی انجام می‌شود که یک رسانای الکتریسیته ساکن است. پس از نمونه‌برداری، فیلتر با بخار استون شفاف‌سازی می‌شود. در زیر میکروسکوپ، الیاف با طول بیشتر از ۵ میکرون و نسبت طول به عرض بیشتر از ۳ شمارش می‌گردد. ارجحیت میکروسکوپ PCM به میکروسکوپ‌های معمولی برای شمارش الیاف از گونه‌های مختلف این است که میکروسکوپ PCM شفافیت میدان دید میکروسکوپ را افزایش می‌دهد و در عین حال نور پس‌زمینه را نیز فیلتر می‌کند.

۶-۱-۷-۴) مقایسه دو روش TEM و PCM

در حالی که هر روش میکروسکوپی TEM و PCM در تعیین غلظت الیاف آزبست مفید هستند، امّا کاستی‌هایی نیز در کاربرد آنها وجود دارد. PCM توسط EPA و OSHA برای تعیین مقدار آزبست توصیه شده است امّا روش‌های آنها نقایصی نیز دارد. مشکل اصلی PCM این است که سایر الیاف غیر آزبستی را نیز به‌صورت الیاف آزبست شمارش می‌کند و قدرت تفکیک آنها را از یکدیگر ندارد. زیرا روش افتراقی PCM فقط برای الیاف آزبست نیست و هر گونه الیافی را در اندازه‌های آزبست شمارش می‌نماید. به عنوان مثال، اگر در شرایط نمونه‌برداری، الیاف فایبرگلاس در هوا آزاد شود، درستی روش PCM برای تعیین الیاف آزبست کاهش می‌یابد. از دیگر اشکالات PCM این است که نمی‌تواند فیبرهایی با طول کمتر از ۵ میکرون و عرض کمتر از ۰.۲۵ میکرومتر را تشخیص دهد که ممکن است منجر به عدم شناسایی الیاف کوچک آزبست شود.

روش TEM می‌تواند فیبرهایی با طول کمتر از ۰.۵ میکرومتر و عرض ۰.۱ میکرومتر را تشخیص دهد. TEM همچنین می‌تواند به طور مستقیم الیاف آزبست را به‌طور مثبت شناسایی کند و با اسکن مورفولوژی الیاف و ترکیب

عنصری، آن‌ها را از سایر الیاف متمایز نماید. تحقیقات اخیر نشان داده است که روش TEM الیاف آزبست کریزوتیل با طول بیشتر از ۵ میکرومتر را چهار برابر بیشتر از روش PCM شمارش می‌کند؛ به عبارت دیگر، دقت روش TEM چهار برابر دقت روش PCM است.

OSHA بیان می‌کند ضمن اینکه روش TEM یک روش آنالیز برتر در شمارش الیاف آزبست است، PCM بهترین روش برای ارزشیابی مواجهه شغلی شاغلین و مقایسه میزان مواجهه‌های شغلی با استانداردهای حد مجاز شغلی از قبیل PEL، OEL و یا TLV است. این ادعای سازمان OSHA به دو دلیل به‌شرح زیر ذکر شده است:

الف) دلیل اول به لحاظ نبود مطالعات تحقیقاتی قابل ملاحظه اپیدمیولوژیکی در چند دهه گذشته است که از روش‌های دیگر غیر از میکروسکوپ PCM در آن‌ها استفاده شده است. میکروسکوپ PCM اثرات بهداشتی مرتبط با مواجهه شغلی را به‌صورت تاریخی در نیم قرن گذشته ثبت نموده است و نورم‌های ارزیابی ریسک در این زمینه منحصر به روش PCM است.

ب) روش TEM بسیار گران‌تر از روش PCM است. در آزمایشگاه، شمارش الیاف نمونه‌های هوای به روش TEM می‌تواند ۵ برابر بیشتر از روش PCM هزینه داشته باشد. TEM به‌طور معمول مورد استفاده قرار نمی‌گیرد و ضمناً روش TEM نمی‌تواند در محل مانند PCM انجام شود.

۶-۱-۷-۵) نتیجه گیری در مورد روش شمارش الیاف هوابرد آزبست

به‌طور کلی، نمونه‌برداری و شمارش الیاف آزبست هوا به روش TEM به دلیل دقت و صحت، روش برتر است. با این حال، PCM به دلیل نهادینه شدن روش در طول نیم قرن گذشته و هزینه کمتر، به‌عنوان شاخص مواجهه در مطالعات اپیدمیولوژیکی در نظر گرفته می‌شود. در حالی که بسیاری از شرکت‌های مهندسی بهداشت حرفه‌ای فقط از PCM به‌عنوان روش ارزشیابی آزبست در مسائل ارجاع شده استفاده می‌کنند، برخی از مقامات بهداشتی جهان هر دو روش PCM و TEM را برای ارزشیابی آزبست هوابرد مورد نظر قرار داده‌اند.

۶-۱-۷-۶)   کاربرد میکروسکوپ PCM در رشته مهندسی بهداشت حرفه‌ای

همانطور که پیش‌تر گفته شد، الیاف آزبست در گذشته در مقادیر زیاد برای استحکام بیشتر و عایق‌کاری حرارتی مصالح ساختمانی منازل، اماکن تجاری و صنایع مختلف استفاده می‌شد که در دهه‌های اخیر نیز به مقدار کمتر هنوز مورد استفاده قرار می‌گیرد. الیاف شیشه‌ای مصنوعی نیز از دیگر محصولاتی است که به‌طور معمول در صنایع برای مصارف عایق‌کاری استفاده می‌شود و اثرات تحریک‌کنندگی برای مجاری تنفسی دارند. اما این گروه از الیاف نیز به دلیل مقاومت حرارتی مشابه با الیاف آزبست در صنایع به وفور به‌کار برده می‌شوند. با توجّه به اثرات اقسام الیاف آزبست و الیاف شیشه‌ای ساخته شده، موضوع ارزشیابی مواجهه شغلی کارگران هنوز مطرح است. دو روش OSHA-160 و NIOSH-7400 برای نمونه‌برداری و شمارش الیاف توسط سازمان‌های ارائه‌دهنده استانداردهای اندازه‌گیری ارائه شده است. در ادامه، دو مثال از تحقیقات پژوهشی آذری و همکاران در زمینه شمارش الیاف آزبست به‌شرح زیر ارائه می‌شوند که در طول دو دهه گذشته در آزمایشگاه دانشکده بهداشت دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی انجام شده است.

مثال نخست: شمارش الیاف آزبست با استفاده از میکروسکوپ PCM

الیاف آزبست کریزوتیل وارداتی از روسیه عمدتاً برای مصارف تولیدی در ایران استفاده می‌شود و خطرات مرتبط با آن در قالب ریسک بروز آزبستوزیس و سرطان می‌بایست مورد ارزیابی قرار گیرد. در این مثال، میزان مواجهه شغلی ۶۱ نفر از کارگران مرد یک کارخانه تولیدکننده کفشک ترمز با آزبست بر طبق روش مصوب NIOSH-7400 اندازه‌گیری گردید. سپس مواجهه تجمعی از حاصلضرب مواجهه معمول کارگران و سابقه کاری آن‌ها تعیین شد.

ارزیابی ریسک بهداشتی کارگران در معرض الیاف آزبست با توجّه به معیارهای ریسک توصیه‌شده توسط سازمان EPA برآورد شد. در این تحقیق، پارامترهای عملکردی ریه مانند حجم بازدم اجباری در یک ثانیه (FEV1)،

ظرفیت حجمی اجباری (FVC) و نسبت دو پارامتر یاد شده FEV1/FVC در کارگران سازنده لنت ترمز اندازه‌گیری شدند.

همبستگی اصلاح نشده و اصلاح شده برای بررسی ارتباط بین دُز تجمعی (fiber/ml-yr) و پارامترهای عملکرد تنفسی (FEV1، FVC و FEV1/FVC) مورد بررسی قرار گرفت. مواجهه شغلی اکثر کارکنان با الیاف آزبست بیشتر از حد مواجهه شغلی ۰.۱ لیف بر میلی‌لیتر هوا و در محدوده ۰.۰۶-۸.۰۶ لیف بر میلی‌لیتر ارزشیابی گردید.

مواجهه تجمعی کارگران لنت ترمز در دامنه ۰.۰۲ تا ۱۱۰.۷۷ لیف بر میلی‌لیتر هوا در سال به‌دست آمد. با توجّه به معیارهای ریسک بیان‌شده توسط ATSDR، ریسک بهداشتی از نظر تغییرات فیبروز ریوی برای حداقل ۲۴.۶٪ از افراد در معرض مواجهه پیش‌بینی گردید. لازم به ذکر است که با توجّه به معیارهای ریسک سرطان ریه که توسط EPA بیان‌شده است، ۵۹٪ از کارگران در معرض مواجهه با آزبست دارای ریسک افزوده نسبت به کارگران شاهد بدون مواجهه با الیاف آزبست بودند. همبستگی منفی معنی‌داری بین پارامترهای عملکرد ریه و مواجهه تجمعی با الیاف آزبست اصلاح‌شده بر اساس سن و BMI مشاهده شد ($P<0.05$).

مثال دوم: شمارش الیاف آزبست با استفاده از میکروسکوپ PCM

همانطور که پیش‌تر گفته شد، روش میکروسکوپی PCM برای شمارش الیاف آزبست علی‌رغم مشکلات و محدودیت‌هایی که دارد، از طرف سازمان OSHA به‌عنوان یک روش ارجح برای ارزشیابی مواجهه شغلی کارگران تشخیص داده شده است. در این پروژه تلاش گردید روش PCM برای اندازه‌گیری الیاف آزبست بهینه‌سازی شود. مشکلات روش اصلی برای تشخیص افتراقی الیاف آزبست از طریق روش‌های مکمل XRD، SEM و FT-IR و شمارش الیاف آزبست از طریق میکروسکوپ PCM مجهز به نمایشگر برطرف گردید و نتایج اعتبارسنجی این پروژه نیز با هدف بهبود عملکرد روش PCM برای شمارش بهتر الیاف آزبست انجام شد. به خلاصه‌ای از تحقیق صورت گرفته در ادامه اشاره خواهد شد.

مواد و روش‌ها: با استفاده از استاندارد آزبست از دانشکده علوم زمین دانشگاه تبریز و به کمک یک کمپرسور هوا، الیاف هوابرد آزبست در یک محفظه بسته به‌صورت مقطعی تولید گردید. سپس نمونه‌برداری از الیاف آزبست بر اساس روش ID-160 ارائه‌شده از سوی سازمان OSHA انجام شد و ۹۵ نمونه در تراکم‌های متنوع و با تغییر در مدت زمان نمونه‌برداری تولید گردید. نمونه‌های برداشته‌شده بر روی فیلتر استر سلولزی بر طبق روش ID-160 آماده‌سازی گردید و الیاف آزبست موجود بر روی هر فیلتر با میکروسکوپ فاز کنتراست Nikon متصل به کامپیوتر و نمایشگر و همچنین یک میکروسکوپ فاز کنتراست ساده Leitz شمارش گردید. تمامی نمونه‌ها به‌صورت یک‌سو کور توسط یکی از نویسندگان این پژوهش شمارش شدند و داده‌های به‌دست‌آمده با آزمون‌های t زوجی، ضریب همبستگی و آنالیز Bland-Altman مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. ضمناً نمونه‌های مشابهی برای آنالیز کیفی توسط دستگاه FT-IR، میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)[1] و دستگاه XRD تهیّه شدند.

یافته‌ها: تراکم آزبست روی فیلترها در محدوده کمتر از ۱۰۰ تا ۶۰۰ الیاف بر میلی‌متر مربع اندازه‌گیری گردید. از نظر آماری، تفاوت معنی‌داری در تراکم ۹۵ نمونه شمارش شده توسط دو سیستم میکروسکوپ فاز کنتراست مشاهده شد (P<۰.۰۰۱). میکروسکوپ فاز کنتراست Nikon مجهز به نمایشگر کامپیوتری تعداد بیشتری از الیاف آزبست را در مقایسه با میکروسکوپ فاز کنتراست Leitz نشان داد. ضمناً ضریب تغییرات میکروسکوپ Nikon به‌مراتب کمتر از میکروسکوپ Leitz به‌دست آمد. نمونه‌ها با استفاده از XRD، FT-IR و SEM مورد تجزیه و تحلیل کیفی قرار گرفتند و وجود الیاف آزبست در نمونه‌ها تأیید شدند.

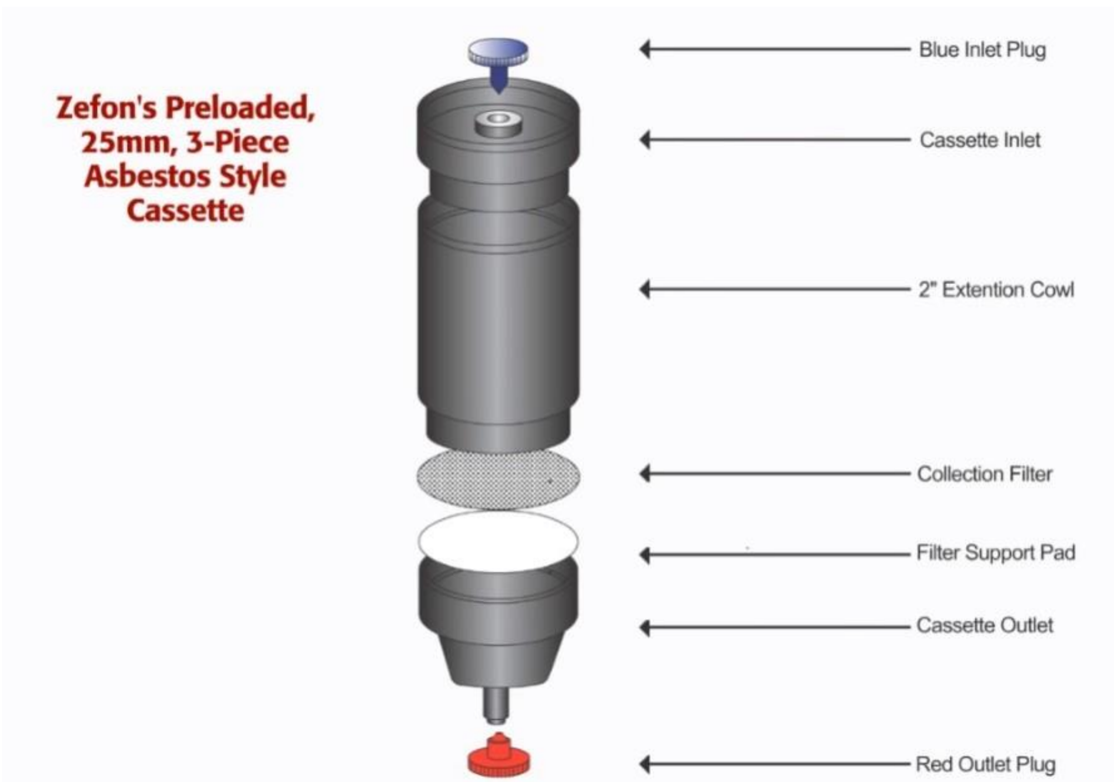
نتیجه‌گیری: روش‌های بهبود یافته شمارش الیاف آزبست با میکروسکوپ PCM شرکت Nikon و تأییدیه نوع الیاف آزبست با سیستم‌های XRD، FT-IR و SEM در این مطالعه، در مقایسه با شمارش الیاف آزبست با میکروسکوپ ساده Leitz دارای تکرارپذیری بهتر مشاهده شد.

[1] Scanning electron microscope

۶-۱-۷-۷) روش ارزشیابی الیاف آزبست اقتباس شده از سازمان‌های مرجع OSHA و NIOSH

از میان روش‌های شمارش الیاف آزبست ارائه‌شده از سوی سازمان‌های معتبر مهندسی بهداشت حرفه‌ای، روش NIOSH به شماره ۷۴۰۰ و روش OSHA به شماره ۱۶۰ در اکثر کارهای اجرایی مورد استفاده کارشناسان مهندسی بهداشت حرفه‌ای در وزارت بهداشت و سایر سازمان‌های دولتی و خصوصی قرار می‌گیرند. از این‌رو در ادامه یک روش تلفیقی از دو روش مرجع با ذکر جزئیات ارائه خواهد شد:

نمونه‌برداری: فیلتر (غشای استر سلولزی با اندازه ۰.۴۵ تا ۱.۲ میکرومتر و به قطر ۲۵ میلی‌متر) بر روی نمونه‌بردار دالانی به ارتفاع ۵۰ میلی‌متر و دارای قابلیت رسانایی قرار می‌گیرد و سپس بر روی کاست نمونه‌بردار نصب می‌شود.



شکل ۸۷-۶) هد نمونه‌برداری سه قطعه‌ای با دالان ۵۰ میلی‌متری برای پخش الیاف به‌صورت یکنواخت بر روی فیلتر

نرخ گذر حجمی نمونه‌برداری: ۰.۵ تا ۱۶ لیتر در دقیقه

حداقل حجم نمونه‌برداری: ۴۰۰ لیتر (برای تراکم معمول الیاف در صنایع به میزان ۰.۱ لیف در سانتیمتر مکعب)

حداکثر حجم نمونه‌برداری: ۳۰۰۰ الی ۱۰۰۰۰ لیتر (در محیط‌های بسیار تمیز با تراکم الیاف آزبست بسیار کمتر از ۰.۱ لیف در سانتیمتر مکعب)

نکته: نمونه‌برداری می‌بایست به گونه‌ای انجام شود که تراکم الیاف آزبست را بر روی فیلتر به حدود ۱۰۰ تا ۱۳۰۰ الیاف در هر میلی‌متر مربع برساند.

نحوه انتقال نمونه به آزمایشگاه: انتقال نمونه به‌صورت عادی انجام می‌شود و نیاز است تا بسته‌بندی و انتقال به نحوی صورت گیرد که از تکان خوردن نمونه‌ها و احتمال ریزش الیاف از روی فیلتر جلوگیری شود.

پایداری نمونه‌ها: در صورت تکان نخوردن نمونه‌ها و عدم قرار گرفتن آن در مسیر جریان باد، پایدار هستند.

تعداد نمونه‌های شاهد: ۲ الی ۱۰ نمونه شاهد برای هر سری از نمونه‌های مورد

روش آنالیز یا تعیین تراکم الیاف آزبست در هوای محیط

آنالیز دستگاهی: میکروسکوپ فاز کنتراست

آنالیت مورد نظر برای تجزیه: ذرات لیفی شکل

آماده‌سازی نمونه: فیلترهای نمونه‌برداری شده با انبرک بر روی لام قرار داده می‌شود و با بخار استون شفاف می‌گردد و سپس با قرار دادن لامل بر روی لام و با استفاده از چسب تری‌استین[1] نمونه بر روی لام ثابت می‌شود و به روش زیر شمارش می‌شود:

شرح آنالیز دستگاهی

۱-میکروسکوپ فاز کنتراست

۲-عدسی ویژه چشمی به نام Walton-Beckett graticule (G-22) برای تعیین سطح دایره بر روی فیلتر به قطر ۱۰۰ میکرومتر

۳-عدسی ویژه شئی به‌صورت خط‌کش که بتواند قطر گراتیکول را به‌طور دقیق اندازه‌گیری نماید (به طول ۱۰۰ یا ۲۰۰ میکرومتر)

۴-کالیبراسیون میکروسکوپ: نمونه‌های استاندارد برای تمرین شمارش از HSE/NPL

۵-دامنه تراکم الیاف به‌طور استاندارد: ۱۰۰ تا ۱۳۰۰ الیاف در هر میلی‌متر مربع از سطح فیلتر

۶-LOD به‌طور تخمینی: ۷ الیاف در میلی‌متر مربع از سطح فیلتر

۷-تکرارپذیری شمارش نمونه‌ها: ۰.۱ تا ۰.۱۲

کاربرد روش

[1] triacetin

محدوده کاری روش بر حسب تعداد الیاف بر سانتی‌متر مکعب در دامنه ۰.۰۴-۰.۵ برای نمونه‌ای از حجم هوای ۱۰۰۰ لیتری است. LOD این روش وابسته به حجم نمونه و کمیت گرد و غبار مزاحم است و برای اتمسفرهای بدون عوامل مزاحم کمتر از ۰.۰۱ فیبر بر حجم هوا بر حسب سانتی‌متر مکعب است. این روش شاخصی از الیاف موجود در هوا را نشان می‌دهد. این روش برای تخمین تراکم الیاف آزبست در هوا استفاده می‌شود، اگرچه روش PCM بین آزبست و سایر الیاف تفاوتی قائل نمی‌شود. این روش می‌بایست همراه با میکروسکوپ الکترونی (روش ۷۴۰۲) برای کمک به شناسایی الیاف استفاده شود. الیاف با قطر کمتر از ۰.۲۵ میکرومتر در این روش تشخیص داده نمی‌شود. این روش ممکن است برای سایر الیاف مصنوعی شیشه‌ای با استفاده از قوانین شمارش خاص مورد استفاده قرار گیرد (پیوست ۲).

روش میکروسکوپی PCM می‌تواند در تعیین تراکم الیافی مانند الیاف شیشه‌ای[1]، الیاف پشم شیشه[2]، الیاف پشم سنگ[3]، الیاف پشم سرباره کوره[4]، الیاف پشم شیشه برای مصارف خاص[5]، الیاف سرامیک مقاوم به حرارت[6] مانند شیشه‌های فیبری بر اساس قوانین شمارش مندرج در ضمیمه شماره-۲ استفاده شود.

عوامل مداخله‌گر: همانطور که پیش‌تر ذکر شد، روش PCM می‌بایست با کمک روش‌های میکروسکوپی PLM و یا TEM برای تشخیص دقیق‌تر استفاده شود، زیرا الیاف مختلف در هوا ممکن است به‌جای الیاف آزبست در شمارش روش میکروسکوپی PCM شمارش گردند. همچنین، تراکم زیاد گرد و غبار در هوا می‌تواند باعث پنهان شدن رؤیت الیاف آزبست زیر میکروسکوپ گردد.

مواد شیمیایی لازم برای روش PCM

استون با درجه خلوص زیاد

ترکیب تری‌استون (گلیسرول تری‌استات[7]) با درجه خلوص زیاد

ملاحظات ویژه اقدامات احتیاطی برای کاربرد استون: استون بسیار قابل اشتعال است. اقدامات احتیاطی برای پیشگیری از حریق ناشی از این حلال باید رعایت شود. گرم کردن استون در حجم‌های بیشتر از ۱ میلی‌لیتر باید در زیر هود آزمایشگاهی و با استفاده از منبع حرارتی بدون شعله و جرقه انجام شود.

وسایل آزمایشگاهی مورد نیاز

۱- نمونه‌بردار: سیستم نمونه‌برداری که از سه قسمت (دالان رسانای الکتریسته ساکن به طول ۵۰ میلی‌متر، فیلتر استر سلولزی با اندازه منافذ ۰.۴۵ تا ۱.۲ میکرومتر و پد پشتیبان).

[1] Continuous filament glass fibers
[2] Glass wool fibers
[3] Rock Wool Fibers
[4] Slag wool fibers
[5] Special purpose glass fibers
[6] Refractory ceramic fibers
[7] glycerol triacetate

تذکر شماره-۱: نمونه‌هایی از فیلترهای استر سلولزی را شفاف‌سازی کرده و از نظر وضوح زمینه‌ای فیلتر بررسی نمایید. همچنین، در صورتی که تعداد الیاف روی فیلتر بیشتر از ۵ مورد در هر ۱۰۰ میدان مشاهده شد، این فیلترها مناسب برای روش شمارش PCM نخواهند بود و باید مرجوع شوند.

تذکر شماره-۲: استوانه رسانای الکتریکی که بر روی هد نمونه‌بردار قرار داده می‌شود، اثرات الکترواستاتیکی را کاهش می‌دهد.

تذکر شماره-۳: از فیلترهای با اندازه منافذ ۰.۸ میکرومتری برای نمونه‌برداری فردی استفاده کنید. در آنالیز همزمان روش PCM با TEM، استفاده از فیلترهای ۰.۴۵ میکرومتری توصیه می‌شود. اگرچه افت فشار بیشتر این فیلترها می‌تواند مانع از استفاده آن‌ها با پمپ‌های نمونه‌برداری فردی شود.

تذکر شماره-۴: کاست‌های نمونه‌برداری دیگری مانند نمونه‌بردار bellmouthed از شرکت (Envirometrics، Charleston، SC) نیز پیشنهاد شده‌اند که می‌تواند یکنواختی جمع‌آوری الیاف را در سطح فیلتر فراهم سازد.

۲- پمپ نمونه‌برداری فردی، مجهز به باتری قابل شارژ برای حداقل ۸ ساعت نمونه‌برداری (حداقل حجم نمونه‌برداری ۴۰۰ لیتر)، و همچنین مجهز به لوله انعطاف‌پذیر برای اتصال به هد نمونه‌بردار.

۳-اتصال هد نمونه‌بردار به پمپ

۴-پیشگیری از نشتی هوا از اتصالات سه قطعه نمونه‌بردار بر روی آن

۶- سیستم تبخیر استون برای شفاف‌سازی فیلتر بر روی لام

۷-به‌کارگیری لاک ناخن بی رنگ برای چسباندن کناره‌های لامل بر روی لام

۸-استفاده از چاقوی جراحی برای چند قطعه نمودن فیلتر نمونه‌برداری در صورت لزوم

۹-انبرک برای جابجایی بدون تماس دست فیلتر از کاست بر روی لام

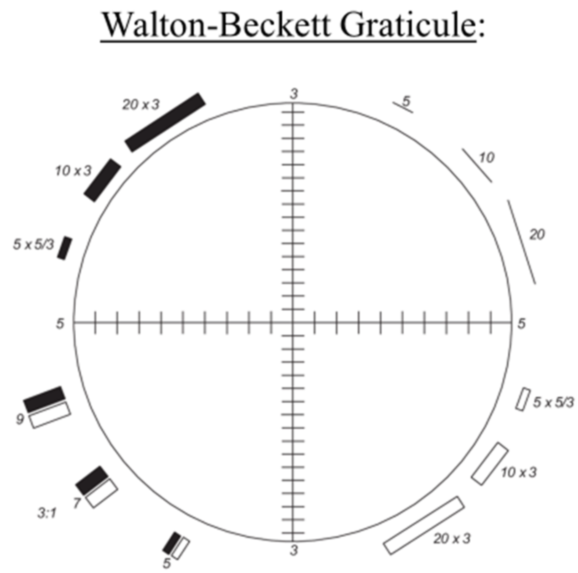
۱۰-میکروپیپت یا سرنگ ۵ ، ۱۰۰ و یا ۵۰۰ میکرولیتری

۱۱-میکروسکوپ PCM، با فیلتر سبز یا آبی، عنبیه میدان قابل تنظیم، بزرگ‌نمایی عدسی چشمی ۸ تا ۱۰ برابر و عدسی شیئی میکروسکوپ PCM با بزرگ‌نمایی ۴۰ تا ۴۵ برابر (بزرگنمایی کل حدود ۴۰۰-۴۵۰)

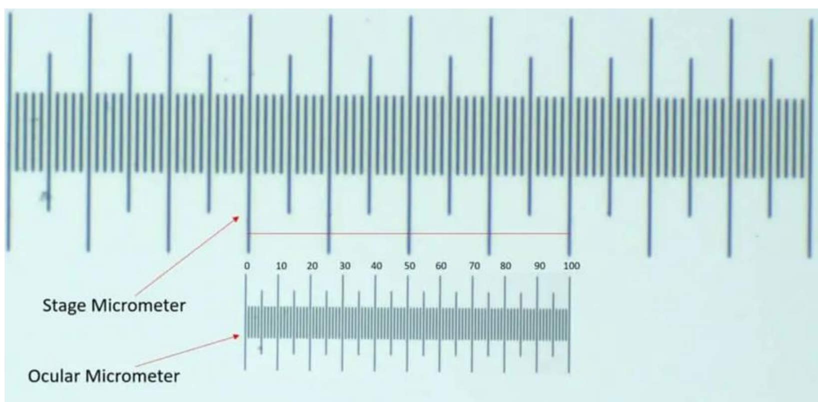
۱۲-گراتیکول، نوع والتون-بکت با میدان دایره‌ای به قطر ۱۰۰ میکرومتر (مساحت= ۰.۰۰۷۸۵ میلی‌متر مربع) در صفحه نمونه (نوع G-22) ساخت شرکت Optometrics USA

۱۳- اسلاید آزمون کنتراست فاز HSE/NPL، Mark II. موجود در Optometrics USA

۱۴- خط‌کش میکرومتری با تقسیمات ۰.۰۱ میلی‌متری برای تعیین اندازه قطر دقیق گراتیکول که به‌طور معمول معادل ۱۰±۱۰۰ میکرون است.



شکل ۸۸-۶) نمایی از گراتیکول والتون-بکت برای شمارش الیاف آزبست در ۳۰ الی ۱۰۰ میدان



شکل ۸۹-۶) خط‌کش میکرومتری با تقسیمات ۰.۰۱ میلی‌متری برای تعیین اندازه قطر دقیق گراتیکول در میکروسکوپ‌های PCM

نمونه‌برداری فردی از کارکنان

۱. هر پمپ نمونه‌برداری فردی را در اتصال به هد نمونه‌برداری و یک روتامتر کالیبره‌شده قرار داده و بین پمپ و هد نمونه‌بردار، کالیبره نمایید.

۲. برای کاهش آلودگی و محکم نگه داشتن قطعات، نمونه‌بردار را با یک نوار کوچک یا نوار چسب رنگ روشن مهر و موم کنید. برای نمونه‌برداری فردی، کاست نمونه‌بردار روباز (بدون درپوش) را با گیره به یقه کارگر متصل کنید. قسمت باز کاست نمونه‌بردار به یقه کارگر بسته می‌شود و سطح باز کاست می‌بایست به سمت پایین باشد.

۳. حداقل دو نمونه شاهد یا ۱۰٪ از کل نمونه‌ها (هر کدام بیشتر است) برای هر مجموعه از نمونه‌ها را به آزمایشگاه ارسال کنید. نمونه‌های مورد از محیط می‌بایست به‌گونه‌ای مدیریت شوند که نشان‌دهنده مواجهه واقعی افراد باشد. درست قبل از نمونه‌برداری، کاست‌های نمونه‌های کنترل را باز کنید. کاورها و کاست‌ها را در یک مکان تمیز (مثلاً یک کیسه یا جعبه دربسته) برای ارسال به آزمایشگاه آماده‌سازی نمایید. به‌طور کلی، نحوه برخورد با کاست‌های نمونه و شاهد یکسان است.

۴. با گذر حجمی L/min ۰.۵ و یا بیشتر نمونه‌برداری را انجام دهید. گذر حجمی برای مدت زمان نمونه‌برداری (۴ ساعت) را طوری تنظیم نمایید که تراکم الیاف در هر میلی‌متر مربع از سطح فیلتر در دامنه $100\ fibers/mm^2$ تا ۱۳۰۰ و یا معادل ۳۸۵۰ تا ۵۰۰۰۰ الیاف در کل فیلتری با قطر ۲۵ میلی‌متر باشد تا بیشترین میزان از صحت نمونه‌برداری از طریق شمارش الیاف حاصل شود.

با توجّه به مراتب فوق محاسبه مدت زمان نمونه‌برداری (T) بر روی یک فیلتر به قطر ۲۵ میلی‌متر با فرمول زیر انجام می‌شود:

$$T=\frac{Ac\ x\ E}{Q\ x\ L\ x\ 1000}$$

که در آن:

Ac= مساحت فیلتر (۳۸۵ میلی‌متر مربع با پیش فرض فیلتری با قطر ۲۵ میلی‌متر)

E= تراکم الیاف در دامنه خواسته شده ۱۰۰ الی ۱۳۰۰ الیاف در هر میلی‌متر مربع

Q= گذر حجمی نمونه‌برداری بر حسب لیتر بر دقیقه

L= تراکم الیاف در هوا بر حسب الیاف در هر میلی‌لیتر

از آنجاییکه بخشی از کناره‌های فیلتر در زیر قسمت فوقانی نمونه‌بردار به نام Cowl قرار می‌گیرد، قطر مفید فیلتر می‌بایست با یک دستگاه کولیس[1] برای محاسبه مساحت فیلتر به‌طور دقیق اندازه‌گیری شود.

نکته: هدف از تنظیم زمان نمونه‌برداری، به دست آوردن بارگذاری بهینه الیاف بر روی فیلتر است، ولی تذکر داده می‌شود که زمان نمونه‌برداری برای الیاف آزبست و سایر الیاف مصنوعی شیشه‌ای که دارای TLV-TWA هستند، می‌بایست حداقل چهار ساعت در نظر گرفته شود. گذر حجمی نمونه‌برداری ۱ تا ۴ لیتر در دقیقه برای ۸ ساعت به جهت دستیابی به تراکم ۰.۱ از الیاف آزبست در هر میلی‌لیتر مناسب است. اما در صورت وجود گرد و غبار زیاد در هوای محیط، حجم کمتر نمونه‌برداری (کمتر از ۴۰۰ لیتر) برای به دست آوردن نمونه‌های قابل شمارش، قابل قبول خواهد بود.

در محیط‌های نسبتاً تمیز با تراکم کم الیاف (کمتر از ۰.۱ لیف در میلی‌لیتر هوا)، حجم‌های بیشتر هوا در دامنه ۳۰۰۰ الی ۱۰۰۰۰ لیتر را می‌توان برای قابلیت تعیین تراکم الیاف به‌کار برد. مراقبت لازم جهت پیشگیری از دادن بار اضافی به فیلتر در شرایطی که بیش از ۵۰٪ از سطح فیلتر با ذرات پوشیده شده است، می‌بایست به‌عمل آید، زیرا در این شرایط خطاهای شمارش الیاف اتفاق خواهد افتاد.

---

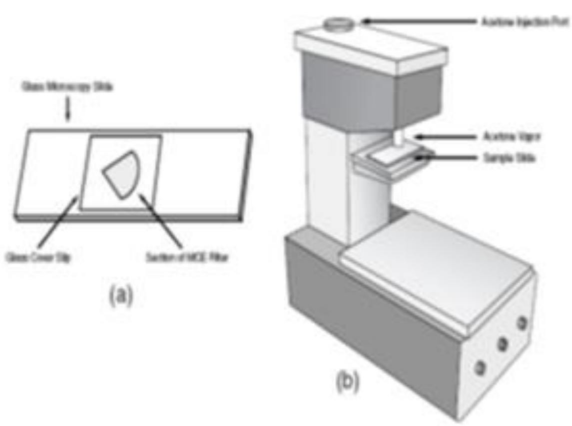
[1] Collis

نکته ۲: بر اساس مقررات سازمان OSHA، حداقل حجم نمونه برداری برای مقایسه با TWA معادل ۲۵ لیتر و حداقل حجم نمونه‌برداری برای مقایسه با زمان گذار[1] ۳۰ دقیقه‌ای معادل ۴۸ لیتر توصیه شده است. منظور از زمان گذار نیز زمانی از مواجهه است که بر حسب نظر کارشناس متخصص میزان مواجهه بالاتر از حدود مجاز توصیه شده باشد.

۵. در پایان نمونه‌برداری، ورودی نمونه‌بردار توسط درپوش مهر و موم شود.

۶. نمونه‌بردار سه قطعه‌ای حاوی فیلتر باید به‌صورت قائم بر زمین در یک بسته‌بندی مناسب ضد ضربه برای پیشگیری از ریزش ذرات از روی فیلتر با علامت‌گذاری عدم چرخش، به آزمایشگاه برده شود. لازم به تذکر است که از فوم پلی‌استایرن به‌دلیل داشتن شارژ الکتروستاتیک و احتمال بلند شدن الیاف از روی نمونه‌بردار و چسبیدن به آن، نباید در بسته‌بندی استفاده شود.

آماده‌سازی نمونه



شکل ۹۰-۶) نحوه قرار گیری فیلتر نمونه‌برداری شده بر روی لام و شفاف‌سازی توسط دستگاه بخار استون

۷. فیلتر نمونه‌برداری شده یا بخش برش داده شده‌ای از آن (۲۵٪ از فیلتر) به آرامی از کاست نمونه‌بردار بر روی لام تمیز و عاری از گرد و غبار و الیاف قرار داده می‌شود.

۸. فیلتر روی لام از طریق بخار استون خالص تولید شده توسط دستگاه تبخیرکننده استون در حرارت حدود ۷۰ درجه سانتی‌گراد شفاف‌سازی می‌شود. شفاف‌سازی باید به گونه‌ای انجام شود که ضریب شکست کمتر از ۱.۴۶ به‌دست آید.

۹. فیلتر نصب شده بر روی لام را زیر دستگاه تبخیرکننده استون قرار دهید تا حداقل ۲۵۰ میکرولیتر از استون تبخیر شده بر روی فیلتر پاشیده شود (کارشناس باید مهارت شفاف‌سازی فیلتر را با تمرین مکرر فرا گیرد). لازم به

[1] excursion

ذکر است که شفاف‌سازی ۳ الی ۵ ثانیه طول می‌کشد. احتیاط‌های لازم به شرح زیر در هنگام کار با دستگاه تبخیرکننده استون باید رعایت شود:

- **اگرچه حجم استون مصرفی کم است، اما نکات ایمنی باید رعایت شود. توصیه می‌شود عمل شفاف‌سازی در یک محیط با تهویه مناسب (مثلاً در زیر هود آزمایشگاهی) انجام شود. مراقب باشید که استون مشتعل نشود. استفاده مداوم از این دستگاه در یک فضای بدون تهویه ممکن است غلظت بخار استون انفجاری ایجاد کند.**

- **از یک میکرو پیپت استفاده کرده و مقدار ۳ تا ۳.۵ میکرولیتر از چسب تری‌استین را در اطراف نمونه قرار دهید و سپس با یک لامل تمیز نمونه را بپوشانید. لازم به‌ذکر است که بعد از اتمام آماده‌سازی، نمونه باید روی یک سطح با دمای حدود ۵۰ درجه سانتی‌گراد برای مدت ۱۵ دقیقه برای خشک شدن چسب قرار داده شود.**

۱۰. تنظیمات میکروسکوپ باید بر اساس دستورالعمل‌های سازنده انجام شود. حداقل یک بار در روز از چشمی میکروسکوپ (یا لنز Bertrand برای برخی از میکروسکوپ‌ها) استفاده کنید تا اطمینان حاصل کنید که حلقه‌های فاز (دیافراگم حلقوی و عناصر تغییر فاز) متحدالمرکز هستند. با هر میکروسکوپ، دفترچه یادداشتی داشته باشید که در آن تاریخ تمیز کردن میکروسکوپ و خدمات اصلی ثبت گردد. هر بار که نمونه‌ای بررسی می‌شود، موارد زیر را انجام دهید:

۱.۱۰منبع نور را برای روشنایی یکنواخت در سراسر میدان دید تنظیم کنید که این فرایند از طریق لنزهای کندانسور انجام می‌شود. در صورت امکان، از سیستم نوری Kohler برای بهترین شکل تباین نوری استفاده کنید.

۲.۱۰. بر روی ذرات مورد نظر تمرکز کنید.

۳.۱۰. مطمئن شوید که ذرات مورد نظر در بهترین شکل زیر میکروسکوپ ظاهر شوند.

۴.۱۰. در صورت کاهش کیفیت تصویر، سیستم اپتیک میکروسکوپ می‌بایست تمیز گردد و در صورت باقی ماندن وضعیت نامناسب تصویر، با سازنده میکروسکوپ می‌بایست تماس گرفته شود.

۱۱. دقت یا تکرارپذیری شمارش الیاف توسط میکروسکوپ PCM می‌بایست مستندسازی گردد. به‌منظور تضمین کیفیت شمارش الیاف، مجموعه‌ای از اسلایدهای مرجع برای آزمون‌های روزانه نگهداری شود. این اسلایدها شامل طیف وسیعی از بارگیری‌ها و سطوح گرد و غبار پس‌زمینه از منابع مختلف از جمله نمونه‌های میدانی و مرجع تشکیل می‌شوند.

الف) به‌عنوان بخشی از برنامه تضمین کیفیت آزمایشگاه، مجموعه‌ای از اسلایدهای مرجع باید برای استفاده روزانه نگهداری شوند. این اسلایدها باید شامل طیف وسیعی از بارگیری‌ها و سطوح گرد و غبار پس‌زمینه از منابع مختلف، از جمله نمونه‌های میدانی و مرجع (مانند PAT، AAR، نمونه‌های تجاری) تشکیل شده باشند.

ب) از نمونه‌های مرجع برای شمارش الیاف به‌صورت دو سو کور استفاده کنید و تکرارپذیری درون روز و برون روز را محاسبه نمایید. مقادیر جداگانه‌ای از استاندارد نسبی را برای تراکم‌های مختلف نمونه‌ها (تراکم‌های ۵ تا ۲۰ لیف در ۱۰۰ میدان گراتیکول، بیش از ۲۰ تا ۵۰ لیف در ۱۰۰ میدان گراتیکول و بیشتر از ۵۰ تا ۱۰۰ لیف در ۱۰۰ میدان گراتیکول) تهیه و تجزیه و تحلیل نمایید.

۱۲. نمونه‌های شاهد را به همراه نمونه‌های مورد آماده و شمارش کنید. نکات زیر در این زمینه توسط کارشناسان آزمایشگاه می‌بایست رعایت گردد:

نکته ۱: هویت فیلترهای شاهد باید برای کارشناس ناشناخته باشد تا زمانی که تمام شمارش‌ها تکمیل شود.

نکته ۲: اگر در یک میدان نمونه شاهد بیش از ۷ لیف در هر ۱۰۰ میدان گراتیکول دیده شود، آلودگی احتمالی نمونه‌ها را گزارش کنید.

۱۳. بازشماری‌های کور را با همان شمارنده روی ۱۰٪ از فیلترهای شمارش شده انجام دهید (اسلایدهایی که توسط شخصی غیر از شمارنده تهیه و برچسب‌گذاری شده باشد). تفاوت بین دو مجموعه از نمونه‌های شمارش شده نباید به‌صورت آماری معنی‌دار باشد.

۱۴. نحوه عملکرد کارشناس آزمایشگاه بخش مهمی از این روش آنالیز است. باید مراقب بود که محیطی بدون استرس و راحت برای شمارش فیبر فراهم شود. باید از یک صندلی با طراحی ارگونومیک استفاده شود و چشمی میکروسکوپ در ارتفاعی راحت برای مشاهده قرار گیرد. نور خارجی باید در سطحی مشابه سطح روشنایی در میکروسکوپ تنظیم شود تا خستگی چشم کاهش یابد. به‌علاوه، شمارنده‌ها باید هر یک یا دو ساعت یک‌بار به مدت ۱۰ تا ۲۰ دقیقه از میکروسکوپ فاصله بگیرند تا خستگی چشمی را محدود کنند. در طول این وقفه‌ها، ورزش دادن چشم و قسمت فوقانی کمر/گردن برای تسکین فشار کاری توصیه می‌شود.

۱۵. همه آزمایشگاه‌هایی که در شمارش آزبست فعالیت دارند در یک برنامه تست مهارت مانند برنامه آزمایش تحلیلی مهارت (AIHA-NIOSH (PAT برای نتایج شمارش آزبست شرکت می‌کنند و به طور معمول نمونه‌های میدانی را با آزمایشگاه‌های دیگر برای مقایسه عملکرد کارشناسان مبادله می‌کنند.

شمارش الیاف و تعیین تراکم آن در هوای محیط

۱۶. اسلاید را روی صحنه میکروسکوپ مدرج زیر عدسی شیئی قرار دهید.

۱۷. میکروسکوپ را روی صفحه فیلتر برای بهترین دید تنظیم نمایید (قدم ۱۰) و سپس شمارش الیاف آزبست را شروع نمایید.

۱۸. شمارش الیاف بر اساس قاعده P&CAM 239 (ضمیمه شماره-۱) انجام می‌شود که به‌شرح زیر به‌طور خلاصه بیان می‌شود.

۱.۱۸. الیاف با طول بیشتر از ۵ میکرومتر که کاملاً در ناحیه گراتیکول قرار دارند، شمارش شوند. برای این منظور، تنها الیاف با طول بیشتر از ۵ میکرومتر در نظر گرفته شوند و طول آن‌ها باید به دقت اندازه‌گیری یا تخمین زده شود.

۲.۱۸. فقط الیافی که دارای طول بیشتر از ۵ میکرون و نسبت طول به عرض برابر یا بیشتر از ۳ به ۱ باشند، شمارش می‌شوند.

۳.۱۸. الیافی که از مرز گراتیکول رد می‌شوند و مابقی لیف در گراتیکول قرار دارد، معادل نصف لیف شمارش می‌شود.

۴.۱۸. در صورتی‌که دو سر فیبر خارج از گراتیکول قرار گیرد و فقط وسط لیف در گراتیکول قرار داشته باشد، آن لیف با این مشخصات نباید شمرده شود. به‌طور کلی، الیاف خارج از گراتیکول را نباید شمارش نمود.

۱۹. شمارش میدان‌های گراتیکول بر اساس سیستم تصادفی طبقه‌بندی شده[1] انجام می‌شود به ترتیبی که در یک میدان نباید گراتیکول دو بار شمرده شود. انتخاب میدان‌ها در سطح فیلتر باید به‌صورت تصادفی و به گونه‌ای باشد که کل میدان‌های شمارش شده تقریباً تمام سطح فیلتر را پوشش دهد. اگر در یک میدان منتخب حباب هوا وجود داشته باشد و یا مجموعه الیاف موجود در آن میدان بیشتر از ۱.۶ سطح میدان را پوشانده باشد، می‌بایست از شمارش الیاف آن میدان صرف نظر کرد و میدان تصادفی دیگری را به‌عوض آن انتخاب نمود که این شرایط را نداشته باشد.

محاسبات و گزارش دهی نتایج

غلظت تخمینی الیاف آزبست موجود در هوا را بر روی نمونه فیلتر با استفاده از فرمول زیر محاسبه نمایید:

$$AC = \frac{\left[\left(\frac{FB}{FL}\right) - \left(\frac{BFB}{BFL}\right)\right] \times ECA}{1000 \times FR \times T \times MFA}$$

که در آن:

AC= تراکم الیاف هوابرد در منطقه تنفسی بر حسب تعداد الیاف بر میلی‌لیتر

FB= تعداد الیاف شمارش شده در نمونه‌های مورد

FL= تعداد میدانهای رؤیت شده در نمونه‌های مورد

BFB= تعداد الیاف شمارش شده در نمونه‌های شاهد

BFL= تعداد میدان‌های رؤیت شده در نمونه‌های شاهد

ECA= سطح مؤثر فیلتر

FR= گذر حجمی پمپ نمونه‌برداری بر حسب لیتر بر دقیقه

MFA= سطح میدان گراتیکول (که برای گراتیکولی با قطر ۱۰۰ میکرومتر معادل ۰.۰۰۷۸۵ میلی‌متر مربع است)

T= مدت زمان نمونه‌برداری بر حسب دقیقه

۱۰۰۰= ضریب تبدیل لیتر به میلی‌لیتر

بر اساس مقررات سازمان OSHA، هر آزمایشگاه می‌بایست برای شمارش الیاف آزبست یک برنامه کنترل کیفیت داشته باشد. برنامه کنترل کیفی زیر از طرف ایستگاه OSHA در شهر Salt Lake City بر اساس تراکم الیاف آزبست و ضریب واریانس ارائه شده است. در این برنامه، ارتباط CV با تراکم الیاف آزبست برای ۳۹۵ نمونه در بازه زمانی سال‌های ۱۹۸۰ تا ۱۹۸۶ ارائه شده است. در این برنامه، هر نمونه بین ۳ تا ۵ مرتبه توسط کارشناسان مختلف شمارش شد. انحراف معیار و ضریب انحراف CV برای هر نمونه محاسبه شد. سپس ارتباط بین CV و شمارش الیاف آزبست به‌شرح فرمول زیر به‌دست آمد:

[1] Stratified Random Sampling

CV = antilog10[A(log10(x))2 + B(log10(x)) + C]

که در آن:

x= تعداد الیاف در هر میلی‌متر مربع

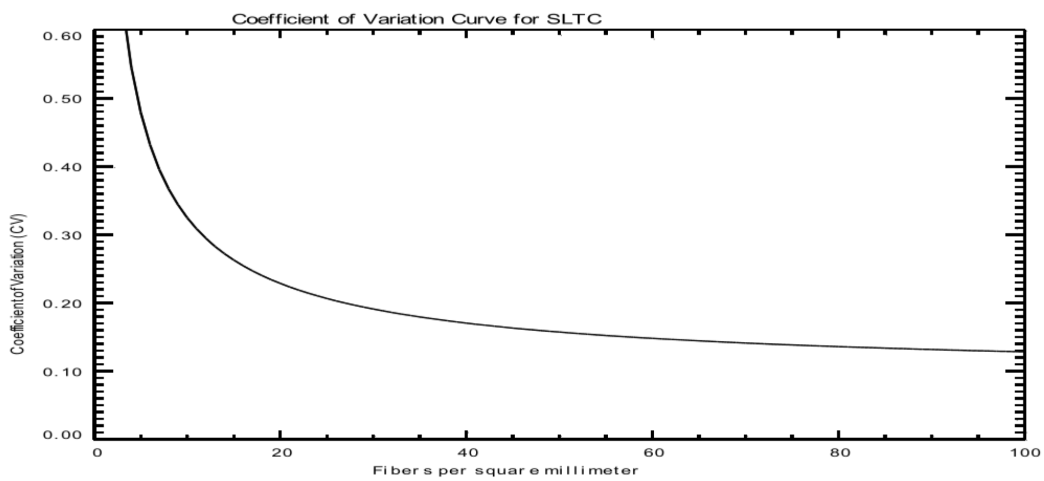
A= معادل ۰.۱۸۲۲۰۵

B= معادل ۰.۹۷۳۳۴۳

C= معادل ۰.۳۲۷۴۹۹

با در نظر گرفتن ضرایب، فرمول فوق به‌شکل زیر محاسبه می‌شود:

CV = antilog10[0.182205(log10(x))2 - 0.973343(log10(x)) + 0.327499]



شکل ۹۱-۶) بیان شماتیک فرمول ارتباط CV و تراکم الیاف آزبست در هر میلی‌متر مربع از فیلترهای نمونه

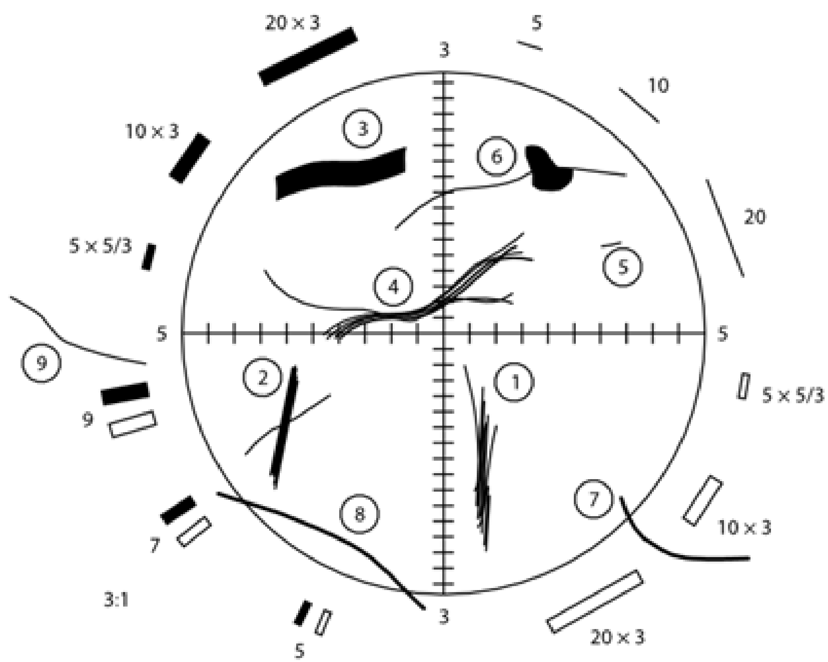
همان‌طور که در شکل فوق دیده می‌شود، ضریب واریانس شمارش الیاف آزبست در دامنه ۰ تا ۱۰۰ لیف در میلی‌متر مربع نمایش داده می‌شود. بر اساس شکل فوق، تراکم بیشتر از ۱۰۰ لیف بر میلی‌متر مربع باعث کاهش CV یا تکرارپذیری شمارش نمی‌گردد و به‌طور معمول شمارش در دامنه ۱۰۰ تا ۱۳۰۰ لیف در میلی‌متر مربع با میزان تکرارپذیری ۱۲٪ قابل انجام است. تراکم بیشتر از ۱۳۰۰ لیف بر میلی‌متر مربع باعث بار اضافی بر روی فیلتر و خطای شمارش می‌گردد.

بخش ضمائم

ضمیمه شماره-۱

شمارش الیاف آزبست بر اساس مقررات معمول P&CAM 239 سازمان NIOSH

بر اساس مقررات حاکم بر شمارش الیاف آزبست و با در نظر گرفتن گراتیکول و الیاف مشاهده شده زیر میکروسکوپ PCM در بزرگنمایی ۴۰۰ تا ۴۵۰ مرتبه، نحوه شمارش الیاف در قالب یک مثال در شکل زیر نمایش داده شده است:



شکل ۹۲-۶) یک نمونه از میدان گراتیکول میکروسکوپ PCM و موقعیت الیاف در داخل و خارج از گراتیکول

شمارش الیاف آزبست در گراتیکول با توجّه به طول، عرض و موقعیت آن‌ها در گراتیکول به‌شرح جدول زیر گزارش می‌گردد:

جدول ۲۰-۶) قوانین حاکم بر شمارش الیاف آزبست با توجّه به موقعیت آنها در گراتیکول والتون-بکت

شماره ذره	تشخیص ذره به‌عنوان لیف آزبست و شمارش آن	توضیحات لازم برای تشخیص و شمارش لیف
۱	۱ لیف	الیاف آزبست قابل مشاهده در میکروسکوپ PCM در واقع در قالب فیبرهای ظریف هستند. اگر به نظر می‌رسد که رشته‌های ظریف از یک دسته هستند، جسم به‌عنوان یک لیف محاسبه می‌شود. با این حال، توجّه داشته باشید که در این روش، تمام ذراتی که معیارهای طول و نسبت ابعاد را دارند، اعم از اینکه به نظر آزبست باشند یا نباشند، شمارش می‌شوند.
۲	۲ لیف	اگر الیافی که معیارهای طول و نسبت ابعاد را طبق مقررات دارند (طول > ۵ میکرومتر و نسبت طول به عرض > ۳) روی یکدیگر قرار گیرند، امّا به نظر از یک دسته نباشند، باید به عنوان الیاف جداگانه حساب شوند.
۳	۱ لیف	اگرچه این اجسام دارای قطر نسبتاً زیادی هستند (> ۳ میکرومتر)، امّا طبق مقررات به عنوان لیف در نظر گرفته می‌شوند. در قوانین شمارش هیچ محدودیتی برای قطر لیف وجود ندارد. توجّه داشته باشید که عرض لیف برای تعیین نسبت طول به عرض باید در وسیع‌ترین بخش فشرده جسم اندازه‌گیری شود.
۴	۱ لیف	گرچه لیف‌های ظریف و بلند ممکن است از بدنه گراتیکول بیرون بیایند، ولی در صورتی‌که به نظر برسد که بخشی از رشته لیف بوده‌اند، به‌عنوان یک رشته از لیف‌های ظریف شمارش می‌شوند.
۵	شمرده نمی‌شود	اگر ذره رشته‌ای شکل دارای طول کمتر از ۵ میکرومتر باشد، به‌عنوان لیف شمارش نمی‌شود.
۶	۱ لیف	لیفی که در بخش کوچکی توسط یک ذره پوشیده شده باشد، هنوز به عنوان یک لیف محسوب می‌شود. این لیف علی‌رغم وجود یک ذره زائد بر روی آن، همچنان ویژگی نسبت طول به عرض ۳ به ۱ را دارد و از این‌رو به عنوان یک لیف در نظر گرفته می‌شود.
۷	۱.۲ لیف	الیافی که یک بار از مرز گراتیکول عبور نمایند به عنوان نصف فیبر شمرده می‌شوند.
۸	نادیده گرفته شود	الیافی که بیش از یک بار از مرز گراتیکول عبور کنند شمرده نمی‌شوند
۹	نادیده گرفته شود	الیافی که خارج از گراتیکول قرار دارند، شمرده نمی‌شوند.

ضمیمه شماره-۲

کاربرد روش PCM برای شمارش الیاف مصنوعی شیشه‌ای

میکروسکوپ PCM اغلب برای اندازه‌گیری شمارش الیاف شیشه‌ای مصنوعی نیز استفاده می‌شود. در حال حاضر، روش استاندارد برای تعیین ذرات لیفی شکل موجود در هوای محیط کار، روش ۷۴۰۰ از سازمان NIOSH است که برای شمارش تمامی الیاف اعم از آزبست و سایر الیاف کاربرد دارد. همانطور که در بخش‌های قبلی شرح داده شد، در روش NIOSH-۷۴۰۰، نمونه‌ها بر روی فیلترهای ۲۵ میلی‌متری استر سلولزی و کاست مجهز به یک دالان در قسمت ورودی جریان هوا به نام Cowl رسانای الکتریکی ۵۰ میلی‌متری جمع‌آوری می‌شوند. بعد از نمونه‌برداری، فیلتر برای شفاف‌سازی پردازش می‌شود و سپس توسط میکروسکوپ PCM با بزرگنمایی ۴۰۰-۴۵۰ مرتبه، با استفاده از گراتیکول Walton-Beckett شمارش می‌شود.

روش‌های شمارش متفاوتی ممکن است برای آنالیز الیاف شیشه‌ای مصنوعی در مقایسه با آزبست (به ترتیب قوانین شمارش I و II) استفاده شوند که می‌تواند مقایسه داده‌های مطالعات مختلف را دشوار کند.

جزئیات این قوانین شمارش در روش ۷۴۰۰ سازمان NIOSH موجود است. به طور خلاصه، دو روش I و II برای شمارش ارائه شده است. بر اساس قانون شمارش I، الیاف قابل شمارش با مشخصه قطر بیش از ۳ میکرومتر و نسبت طول به عرض برابر یا بیشتر از ۳ به ۱ تعریف شده‌اند. در قانون شمارش II، فقط الیاف با قطر کمتر از ۳ میکرومتر و طول بیشتر از ۵ میکرومتر و نسبت طول به عرض برابر یا بیشتر از ۵ به ۱ شمارش می‌شوند.

در هر دو قانون، شمارش بر اساس رؤیت میدان‌های گراتیکول به‌صورت تصادفی طبقه‌بندی شده به ترتیبی است که تعداد میدان‌های تصادفی بتوانند حداقل امکان شمارش ۲۰۰ لیف را فراهم کنند. شمارش الیاف در حداقل ۲۰ میدان می‌بایست انجام شود که برای اعتبار آماری مورد نیاز است. یک مطالعه اخیر نشان داده است که با استفاده از قانون شمارش I، تعداد الیاف بیشتری نسبت به قانون شمارش II شمارش می‌شود. این مطالعه اخیر استفاده از قانون شمارش I را به‌منظور کاهش الیاف شیشه‌ای مصنوعی شمارش نشده در اماکن مختلف توصیه

می‌کند. تعداد الیاف مصنوعی شیشه‌ای همانند الیاف آزبست در واحد تعداد الیاف بر میلی‌لیتر مربع از سطح فیلتر مطرح می‌شوند. لازم به یادآوری است که کلیه الیاف مصنوعی شیشه‌ای غیر از الیاف سرامیکی مقاوم به حرارت، تحریک‌کننده مجاری فوقانی تنفسی و یا در موارد دیگر تحریک کننده پوست و غشاء مخاطی هستند ولی مواجهه با الیاف سرامیکی مقاوم به حرارت با استاندارد حد تماس شغلی مشابه با الیاف آزبست (۰.۲ Fiber/ml) می‌توانند اثرات شدیدتر سلامتی را به‌صورت فیبروز ریوی و کاهش عملکرد دستگاه تنفسی به دنبال داشته باشد.

منابع و مراجع اطلاعاتی

A Practical Guide to High Performance Liquid Chromatography. September 2023. Available from: https://www.scientificlabs.ie/news/article/1312

Application Handbook Liquid Chromatography. Available from: https://www.shimadzu-webapp.eu/magazine/issue-2016-3_en/new-application-handbook-liquid-chromatography/

Agilent. The basics of UV VIS spectrophotometry. Available from: https://www.agilent.com/cs/library/primers/public/primer-uv-vis-basics-5980-1397en-agilent.pdf

Azari M.R., Massoudi M.R., Nejad S., and Motesadi. M., 2008. A new sampler and analysis method for BTEX in ambient air. Tanaffos, 7(3): 47-52.

Azari, M.R., Nasermoaddeli, A., Movahadi, M., Mehrabi, Y., Hatami, H., Soori, H., Moshfegh, E. and Ramazni, B., 2010. Risk assessment of lung cancer and asbestosis in workers exposed to asbestos fibers in brake shoe factory in Iran. *Industrial health*, *48*(1), 38-42.

Azari, M.R., Ramazani, B., Mosavian, M.A., Movahadi, M. and Salehpour, S., 2011. Serum malondialdehyde and urinary neopterin levels in glass sandblasters exposed to crystalline silica aerosols. International Journal of Occupational Hygiene, 3(1), 29-32.

, M., Rokni, M., Salehpour, S., Mehrabi, Y.E., Jafari, M., Naser, M.A., Movahedi, M., Ramezankhani, A., Hatami, H., Mousavian, M and Ramezani, B., 2009. Risk assessment of workers exposed to crystalline silica aerosols in the east zone of Tehran. Tanaffos, 8(3), 43-50.

Azari, M.R., Yazdian, A., Zendehdel, R., Souri, H., Khodakarim, S., Peirovi, H., Panahi, D. and Kazempour, M., 2014. Improved method for analysis of airborne asbestos fibers using phase contrast microscopy and FTIR spectrometry. Tanaffos, 13(3), 38-45.

Biochrome. UV VIS spectrophotometry. Available from: https://www.fishersci.se/shop/products/ultrospec-7500-uv-vis-spectrophotometer/17717359

Golbabaie F, Ostadi M, Mohammad K, Ostadi V, Rismanchian M, Tirgar A, Tirgar, A., Shahtaheri, S. 2007. Feasibility of biological monitoring for evaluating of exposure to Cr6 in Electroplating workshops. Journal of School of Public Health and Institute of Public Health Research, 5 (3) :15-22.

Hosseini, S.Y., Azari, M.R., Zendehdel, R., Souri, H. and Rahimian, R.T., 2015. Feasibility the biological monitoring of workers exposed to benzene and toluene via measuring the parent compounds in the exhaled breath. Health Scope, 4(3): e25774.

Hosseini, S., Rezazadeh-Azari, M, Taiefeh-Rahimian, R, Tavakkol, E. 2014. Occupational risk assessment of benzene in rubber tire manufacturing workers. International journal of occupational hygiene, 6(4): 220-226.

Important HPLC Definitions and Equations. Available from: https://www.obrnutafaza.hr/pdf/korisno/HPLC/Important-HPLC-Definitions-and-Equations.pdf

Jafari, M.J., Karimi, A. and Azari, M.R., 2009. The challenges of controlling organic solvents in a paint factory due to solvent impurity. Industrial health, 47(3): 326-332.

Kamalifar, S., Azari, M.R., Rafieepour, A., Asgari, M., Zendehdel, R., Soori, H., Tavakol, E., Rahmati, A.R. and Ghaziani, M.N., 2019. Alternative Method for the Analysis of Water-Based Metalworking Fluids Using Fourier Transform Infra-Red Spectroscopy. Iranian Journal of Health, Safety and Environment, 6(3): 1323-1329.

Miller, I., 2011. Protein separation strategies. Methods in animal proteomics, pp.41-76.
National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH). Manual of Analytical Methods, Method No. 5026, issue 2: "Oil Mist, Mineral", Fourth ed: NIOSH Publication, Washington, DC. 1996

National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH). Method 5524 for "metalworking fluids". In NIOSH Manual of Analytical Methods (NMAM), 4th ed., Edited by: Eller, P. M. and Cassinelli, M. Cincinnati, Ohio: NIOSH. DHHS/NIOSH Pub. No. 94-113. 2003.

Omidianidost, A., Gharavandi, S., Azari, M.R., Hashemian, A.H., Ghasemkhani, M., Rajati, F. and Jabari, M., 2019. Occupational exposure to respirable dust, crystalline silica and its pulmonary effects among workers of a cement factory in Kermanshah, Iran. Tanaffos, 18(2), 157-162.

Omidianidost, A., Ghasemkhani, M., Azari, M.R. and Golbabaei, F., 2015. Assessment of occupational exposure to dust and crystalline silica in foundries. Tanaffos, 14(3), p.208.

Parsaseresht, G.R., Rezazadeh, A.M., Zendehdel, R., Hashemi, N.S. and Tavakol, E., 2016. Evaluation of occupational exposure and biological monitoring of sand washing workers exposed to silica dusts. Journal of Safety Promotion and Injury Prevention, 4(3), 135-142.

Rafieepour, A., Asgari, M., Azari, M. and ABBAS, G.F., 2018. The Comparison of Fourier Transform Infrared and Ultraviolet Spectroscopy Techniques for Determination of Mineral Oils. Occupational Health, 15(1): 47-54.

Sigma Aldrich. GC Column Selection Guide. Available from: https://www.sigmaaldrich.com/deepweb/assets/sigmaaldrich/marketing/global/documents/891/300/t407133.pdf

Shimadzu corporation. Basics & Fundamentals Gas Chromatography. Available from: https://www.shimadzu.com/an/literature/gc/icc120006.html

Tavakol, E., Azari, M., Zendehdel, R., Salehpour, S., Khodakrim, S., Nikoo, S. and Saranjam, B., 2017. Risk evaluation of construction workers' exposure to silica dust and the possible lung function impairments. Tanaffos, 16(4): 295-304.

Zarei, F., Azari, M.R., Salehpour, S., Khodakarim, S., Omidi, L. and Tavakol, E., 2017. Respiratory effects of simultaneous exposure to respirable crystalline silica dust, formaldehyde, and triethylamine of a group of foundry workers. Journal of Research in Health Sciences, 17(1), 371-377.

فصل ۷: اعتبارسنجی روش‌های تجزیه

۷-۱) مقدمه

انتخاب روش نمونه‌برداری و آنالیز برای ارزشیابی مواجهه شغلی کارکنان یک تصمیم بسیار دقیق و هوشمندانه است. در سایت‌های مختلف، روش‌هایی برای هر ترکیب ارائه شده است. روش‌های نمونه‌برداری و آنالیز بر اساس پارامترهای درستی (Accuracy)، تکرارپذیری (Precision)، حساسیت (Sensitivity)، ویژگی اختصاصی و انتخابی بودن روش (Selectivity & Specificity)، پایداری روش در برابر تأثیر مداخله‌گرها (Ruggedness & Robustness)، سوگیری روش (Bias)، مدت زمان لازم و هزینه آن برای آنالیز، اعتبارسنجی شده‌اند. با این حال، موضوع دسترسی به این روش‌ها در محل جغرافیایی موردنظر نیز یک دلیل مهم دیگر برای رد یا قبول روش است. در نهایت، سؤال اصلی این است که کدام یک از روش‌ها باید برای ارزشیابی مواجهه شغلی انتخاب شود. در این فصل تلاش شده است تا به این سؤال پاسخ داده شود.

۷-۱-۱) پارامترهای اعتبار سنجی روش‌های استاندارد نمونه‌برداری و آنالیز نمونه‌های هوای محیط کار

هدف این فصل تعریف و توصیف معیارهای عملکردی است که بر اساس آن‌ها باید مواجهه شغلی کارکنان با ترکیبات شیمیایی ارزشیابی شود. با توجّه به کاربرد روش‌های استاندارد ارائه‌شده توسط سازمان‌های NIOSH و OSHA برای ارزشیابی مواجهه شغلی کارکنان، ممکن است این سؤال مطرح شود که چرا اعتبار روش‌های استاندارد باید بازبینی شود. پاسخ به این سؤال در چارچوب مطالب علمی این است که در علم، هیچ موضوعی مصون از بررسی‌های مکرر نیست. در مرتبه دوم، باید به این نکته اشاره کرد که چندین روش برای نمونه‌برداری یا آنالیز یک ترکیب ارائه شده است و با توجّه به پارامترهای اعتبارسنجی، بهترین روش در دسترس برای آن انتخاب می‌شود. روش‌های استاندارد از سه بخش اصلی تشکیل شده‌اند:

بخش نخست: شامل ارائه اطلاعات برای نمونه‌برداری است که شامل مدت‌زمان نمونه‌برداری، گذر حجمی (هواگذر) نمونه‌برداری، حجم هوای نمونه‌برداری، شرایط لازم برای انتقال نمونه‌های گرفته‌شده به آزمایشگاه، همراه با تذکرات لازم برای نمونه‌های شاهد و همچنین تذکرات لازم برای کالیبراسیون نمونه‌بردار است.

بخش دوم: روش‌های استاندارد مرتبط با آنالیز شیمیایی نمونه‌ها و اطلاعات لازم برای تنظیم دستگاه‌های آنالیزور، همراه با آماده‌سازی نمونه برداشته‌شده برای آنالیز و تهیه نمونه‌های استاندارد جهت ترسیم خط کالیبراسیون است.

بخش سوم: مرتبط با آنالیز نمونه‌ها و محاسبه کمّیت نمونه‌ها است. در مرتبه بعدی، ارزش داده‌های به‌دست‌آمده با اعتبارسنجی روش استفاده‌شده مرتبط می‌باشد. لازم به ذکر است که تمام روش‌های استاندارد از سازمان‌های NIOSH و OSHA توسط پارامترهای خاصی اعتبارسنجی شده‌اند که در مراتب بعدی این فصل مورد بررسی قرار می‌گیرند. به‌طور کلی، پارامترهای اعتبارسنجی اعلام‌شده در روش‌ها می‌بایست به‌صورت یک هدف آرمانی در نهادینه‌سازی روش‌ها در آزمایشگاه‌های مرجع کشورهای مختلف مورد توجّه قرار گیرند. بدین ترتیب، پارامترهای اعتبارسنجی روش‌های استاندارد می‌بایست در آزمایشگاه ارائه‌دهنده خدمات، راستی‌آزمایی شوند. این اقدام می‌بایست به‌عنوان یک گام کلیدی برای ارزشیابی صلاحیت علمی آزمایشگاه‌ها در نظر گرفته شود.

اعتبار روش‌های استاندارد نمونه‌برداری و آنالیز بر اساس پارامترهایی از قبیل ویژگی روش[۱]، دقّت یا تکرارپذیری[۲]، درستی یا صحّت[۳]، محدوده خطی بودن نمودار کالیبراسیون[۴] جهت تعیین دقیق مقدار نمونه برداشته شده از محیط (نمونه مجهول)، حد تشخیص کیفی[۵]، حد تشخیص کمّی[۶]، پایداری روش در برابر تأثیر مداخله‌گرها[۷]،

---

[1] Specificity
[2] Precision
[3] Accuracy
[4] Linear Range Concentration
[5] Limit of Detection
[6] Limit of Quantitation
[7] Robustness and Ruggedness

حساسیت[1]، سوگیری روش[2]، مدت زمان آنالیز و هزینه دستگاه‌ها و مواد شیمیایی مورد استفاده در روش نمونه‌برداری[3] می‌بایست مورد توجّه قرار گیرد.

۷-۱-۲) جزئیات پارامترهای اعتبارسنجی روش‌های استاندارد

۷-۱-۲-۱) درستی یا صحّت روش

نزدیکی داده‌های به‌دست‌آمده از روش نمونه‌برداری با توجّه به خطاهای روش به داده‌های واقعی، یا به‌عبارت‌دیگر نزدیکی غلظت ترکیب شیمیایی نمونه‌برداری‌شده با غلظت آن در محیط واقعی، به‌عنوان معیار درستی روش تلقی می‌شود. (شکل ۱-۷). اندازه‌گیری درستی روش را می‌توان بر اساس درصد بازیابی[4] بررسی نمود. برای تعیین درصد بازیابی، نمونه‌ای با غلظت مشخص[5] با استفاده از روش مورد نظر اندازه‌گیری و آنالیز می‌شود و سپس نسبت غلظت اندازه‌گیری شده با استفاده از فرمول زیر محاسبه می‌شود:

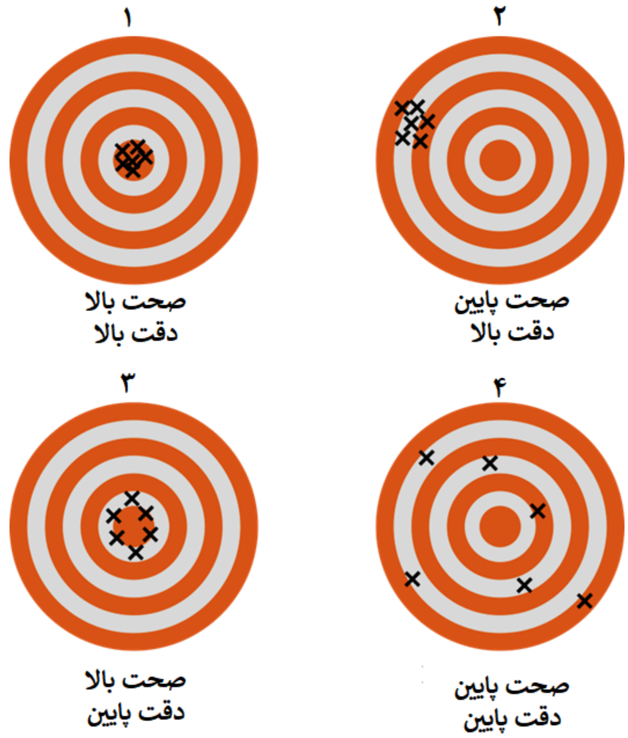
$$\text{درصد بازیابی} = \frac{\text{غلظت اندازه گیری شده}}{\text{غلظت واقعی}} \times ۱۰۰$$

محاسبه صحّت روش را نیز می‌توان از طریق فرمول ریاضی زیر برآورد نمود:

$$\text{خطا} = \text{مقدار به دست آمده از روش} - \text{مقدار حقیقی}$$

$$\text{خطای نسبی} = \frac{\text{خطا}}{\text{مقدار حقیقی}} \times ۱۰۰$$

[1] Sensitivity
[2] Bias
[3] Equipment, Time, and Cost of Method
[4] Recovery
[5] Spike Sample



شکل ۱-۷) نمایش صحّت و دقّت پاسخ‌ها

۷-۱-۲-۲) تکرار پذیری یا دقّت روش

نتایج به‌دست‌آمده از نمونه‌ای که چندین بار تجزیه می‌شود یا آنالیز چند نمونه همسان با روش موردنظر، به‌ندرت با یکدیگر یکسان خواهند بود. به‌طور معمول، نتایج به‌دست‌آمده دارای پراکندگی تصادفی هستند. دقت، یا همان نزدیکی داده‌های یک نمونه یا چند نمونه همسان به یکدیگر، معیاری است که با استفاده از آن می‌توان خطاهای آزمایشگاهی را سنجید.

$$\text{انحراف معیار نسبی} = \frac{\text{انحراف استاندارد نتایج}}{\text{میانگین نتایج}}$$

$$\text{درصد انحراف معیار نسبی} = \frac{\text{انحراف استاندارد نتایج}}{\text{میانگین نتایج}} \times ۱۰۰$$

۷-۱-۲-۳) حساسیت یا توان روش

حساسیت اغلب با حد تشخیص یک روش، که عبارت است از کمترین مقدار آنالیت قابل تشخیص توسط دستگاه آنالیزور، اشتباه گرفته می‌شود. به‌طور کلی، حساسیت روش برای اندازه‌گیری نمونه‌هایی با تراکم‌های بسیار کم کاربرد دارد. مقایسه حساسیت دو روش برای نمونه‌های مشابه از طریق مقایسه سیگنال‌های روش انجام می‌شود. از طرف دیگر، حساسیت روش می‌تواند به‌صورت شیب خط کالیبراسیون نشان داده شود، بدین ترتیب که روش حساس‌تر دارای شیب تندتری نسبت به روش دیگر است.

$$S = mc + s_{bl}$$

که در آن:

S= بزرگی سیگنال پاسخ در تراکم نمونه‌برداری
s_{bl}= بزرگی سیگنال نمونه شاهد (نمونه فاقد آنالیت مورد نظر)
m= شیب خط کالیبراسیون یا همان حساسیت روش
c= غلظت نمونه

۷-۱-۲-۴) ویژگی روش برای آنالیز اختصاصی یا روش انتخابی برای ترکیب شیمیایی

ویژگی روش به معنای توانایی آنالیز ترکیب شیمیایی مورد نظر با درصد اطمینان مناسب است. ویژگی روش‌ها در دو حالت اختصاصی[1] و انتخابی[2] قابل طرح می‌باشد. اختصاصی یا انتخابی بودن روش، تقریباً دارای یک مفهوم می‌باشند ولی ویژگی روش برای تشخیص اختصاصی به مفهوم اندازه‌گیری بدون ابهام[3] یک ترکیب از میان ترکیبات مختلف است که از طریق تشخیص اثر انگشت ترکیب شیمیایی توسط سیستم آشکارسازهای جرمی امکان‌پذیر می‌شود. ویژگی اختصاصی بودن روش در سیستم‌های آنالیز دستگاهی معمولاً با استفاده از آشکارسازهای جرمی

[1] Specific
[2] Selective
[3] unequivocally

(مانند GC-MS، HPLC-MS، ICP-MS) قابل اندازه‌گیری است که تعیین درستی نتایج آنالیز را در حضور ترکیبات دیگر مانند ناخالصی‌های ترکیبات امکان‌پذیر می‌سازد.

ویژگی روش برای تشخیص انتخابی نیز پارامتری است که قابلیت تفکیک ترکیبات با ساختار شیمیایی مشابه (برای مثال ترکیبات ارگانوفسفره یا ارگانوکلره یا ترکیبات آلی تک حلقوی با گروه‌های عاملی مختلف) از یکدیگر را ممکن می‌سازد. از روش‌های دیگر آنالیز که دارای ویژگی انتخابی هستند می‌توان به روش‌های طیف‌سنجی اتمی، روش‌های کروماتوگرافی گازی و یا کروماتوگرافی مایع با عملکرد عالی با آشکارسازهای مختلف غیر از آشکارساز جرمی، روش میکروسکوپی مجهز به عدسی‌های ویژه تباین نوری[۱] برای شمارش تراکم الیاف هوابرد (آزبست، پشم شیشه، پشم سنگ و سایر الیاف معدنی) و روش‌های طیف‌سنجی نوری به‌صورت فرابنفش-مرئی و طیف‌سنجی مادون قرمز تبدیل فوریه اشاره کرد.

لازم به‌ذکر است که ممکن است چندین روش برای آنالیز یک ترکیب شیمیایی وجود داشته باشد که می‌توان آنها را به دو دسته روش‌های انتخابی[۲] و روش‌های اختصاصی‌تر[۳] تقسیم کرد. اگرچه روش‌های انتخابی از کفایت لازم برای آنالیز کمّی و کیفی گروهی از ترکیبات شیمیایی برخوردار هستند امّا در شرایط خاص که امکان خطا در تشخیص یک ترکیب از این گروه وجود داشته باشد، توصیه می‌گردد از روش‌های اختصاصی‌تر برای آنالیز آن استفاده نمود که قادر است با ضریب اطمینان بیشتر و میزان کمتری از مداخله ترکیب را شناسایی کند. به‌عنوان مثال روش NIOSH-۱۵۰۱ (با آنالیزور GC-FID) یک روش انتخابی برای شناسایی ترکیبات آلی فرار می‌باشد امّا از طرفی روش NIOSH-۳۹۰۰ (با آنالیزور GC-MS) یک روش اختصاصی‌تر برای تشخیص و آنالیز این گروه از ترکیبات است که از دقّت و صحّت بیشتری در تعیین مقدار آلاینده برخوردار می‌باشد.

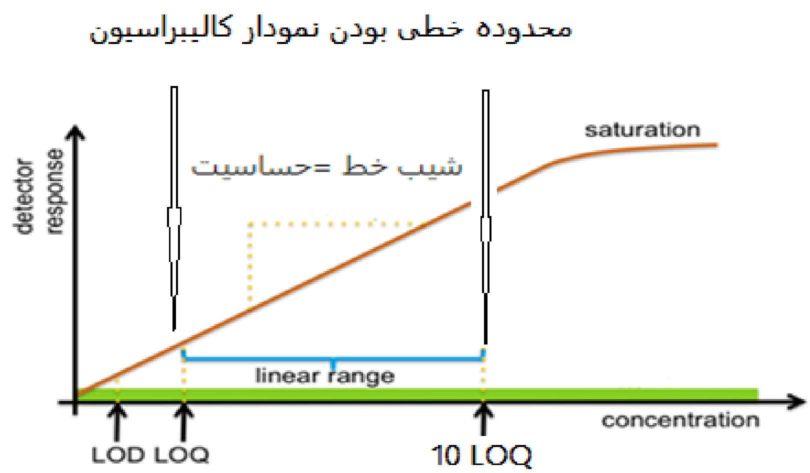
[1] Phase Contrast Microscopy
[2] Selective Methods
[3] Specific Methods

۷-۱-۲-۵) پایداری نمونه در برابر تغییرات فیزیکی و شیمیایی ناشی از آماده‌سازی و آنالیز

روش آنالیز و فرآوری نمونه‌ها به‌صورت شیمیایی و فیزیکی ممکن است تغییراتی در ماهیت ترکیب نخستین ایجاد کند که در آنالیز نمونه مشکل‌ساز گردد. برای مثال، حرارت دادن نمونه یا اضافه نمودن ترکیبات شیمیایی ممکن است باعث از دست رفتن نمونه یا تخریب آن شود. از این رو، لازم است مراتب ذکر شده روش منتخب به‌طور صحیح در آزمایشگاه اجرا گردد و تست‌های بازیابی روش برای درستی کار بررسی شود.

۷-۱-۲-۶) دامنه خطی نمونه‌های استاندارد

تعیین غلظت ترکیبات شیمیایی نمونه‌برداری شده با استفاده از نمونه‌های استاندارد و ترسیم خط کالیبراسیون انجام می‌شود. برای این منظور، در شرایط آزمایشگاهی نمونه‌های استاندارد از ترکیب شیمیایی مورد نظر در غلظت‌های مختلف و متوالی تهیّه می‌شود و پس از تجزیه توسط دستگاه آنالیزور، مساحت زیر سطح پیک نمودار ناشی از سیگنال‌های خروجی مربوط به غلظت به دست می‌آید. از ترسیم نمودار مربوط به عدد مساحت پیک برای هر غلظت، منحنی کالیبراسیون به دست خواهد آمد. در صورتی‌که مقدار ضریب رگرسیون (R^2) به دست آمده برای نمودار رسم شده در غلظت‌های مختلف در محدوده قابل قبول (معادل ضریب رگرسیون ۰.۹۹۵≤) باشد، خط کالیبراسیون به دست آمده در دامنه خطی تلقی خواهد شد و برای تعیین تراکم نمونه گرفته شده از ترکیب شیمیایی در محیط کار، قابل استفاده خواهد بود (شکل ۲-۷).



شکل ۲-۷) محدوده خطی نمودار کالیبراسیون در ارتباط غلظت نمونه استاندارد با پاسخ آشکارساز دستگاه آنالیزور

۷-۱-۲-۷) سوگیری

سوگیری یک روش آنالیز می‌تواند در دو حالت منفی یا مثبت تعریف شود و معمولاً از مقایسه داده‌های به‌دست آمده از روش مرجع برای تعیین مقدار یک ترکیب شیمیایی با داده‌های به‌دست آمده از روش انتخابی در آنالیز نمونه‌های مشابه به‌دست می‌آید. تعیین سوگیری روش، به‌ویژه در اعتباربخشی روش‌های نوین نمونه‌برداری و آنالیز ترکیبات شیمیایی، از اهمیت زیادی برخوردار است.

$$\text{سوگیری}\ (\%) = \frac{\text{تراکم به دست آمده از روش مرجع - میانگین تراکم به دست آمده از روش انتخابی}}{\text{تراکم مرجع}} \times ۱۰۰$$

۷-۱-۲-۸) حد تشخیص کیفی

حد تشخیص یک روش آنالیز، کمترین مقدار آنالیت در یک نمونه است که می‌توان آن را تشخیص داد، اما لزوماً به‌عنوان مقدار دقیق کمی اندازه‌گیری نمی‌شود. حد تشخیص کیفی (LOD) ممکن است با تجزیه و تحلیل نمونه‌هایی با غلظت‌های شناخته‌شده از آنالیت و با ایجاد حداقل سطح (پایین‌ترین استاندارد کالیبراسیون) که در

آن آنالیت به‌طور قابل اعتمادی قابل تشخیص باشد، تعیین شود. پایین‌ترین استاندارد کالیبراسیون که پاسخ پیک مربوط به آنالیت را ایجاد می‌کند، باید n بار اندازه‌گیری شود (معمولاً بین ۶ تا ۱۰ بار) و میانگین پاسخ (X) و انحراف معیار (SD) محاسبه گردد.

LOD = X + (۳ × SD)

۷-۱-۲-۹) حد تشخیص کمّی

حد تشخیص کمّی (LOQ) همانند مراتب فوق اندازه‌گیری می‌شود و سپس با فرمول زیر محاسبه می‌گردد:

LOQ = X + (۱۰ × SD)

۷-۱-۳) نحوه انتخاب یک روش نمونه‌برداری و آنالیز برای ارزشیابی میزان مواجهه گروه‌های مختلف SEG

همان‌طور که در جدول ۱-۷ آورده شده است، روش‌های مختلفی برای اندازه‌گیری یک گروه از ترکیبات شیمیایی وجود دارد. برای مثال ترکیبات آلی می‌توانند توسط چندین روش آنالیزی مختلف از قبیل GC, HPLC, GC/MS, LC/MS تعیین مقدار شوند و یا فلزات می‌توانند توسط چندین روش مختلف AA, GFAA, ICP, ICP/MS آنالیز شوند. در اینجا مطلب اساسی انتخاب یکی از روش‌های موجود به‌عنوان یک روش مناسب برای ارزشیابی میزان مواجهه کارکنان با ترکیب شیمیایی مورد نظر و با توجّه به محدودیت‌های محل است.

جدول ۱-۷) روش‌های کلی آنالیز دستگاهی و آماده‌سازی نمونه‌ها قبل از آنالیز

نام ترکیب	آماده‌سازی نمونه‌ها	روش‌های آنالیز دستگاهی
ترکیبات آلی (Organics)	استخراج شیمیایی، ساخت تراکم در محدوده مناسب، پاکسازی از عوامل مداخله‌گر، مشتق سازی و تبدیل نمونه به‌صورت فاز بخار	GC, HPLC, GC/MS, LC/MS
ترکیبات آلی فرار (Volatile Organic Compounds)	تبدیل به فاز بخار	GC, GC/MS
فلزات به‌صورت دمه و ذرات قابل تنفس و استنشاقی	استخراج شیمیایی، ساخت تراکم در محدوده مناسب	AA, GFAA, ICP, ICP/MS
فلزات به‌صورت دمه و ذرات قابل تنفس و استنشاقی	استخراج، مشتق‌سازی، ساخت تراکم در محدوده مناسب	UV-VIS Spectrometry, Ion Chromatography
یون‌ها به‌صورت میست	استخراج، ساخت تراکم در محدوده مناسب، مشتق سازی	Ion Chromatography, UV-VIS Spectrometry
آئروسل‌های سیلیس کریستالی	آماده‌سازی پودر سیلیس کریستالی ذرات میکرونی	XRD, FT-IR
آئروسل‌های لیفی شکل	نمونه‌برداری و آماده‌سازی نمونه‌ها برای شمارش الیاف آزبست	PCM

GC = گاز کروماتوگرافی، HPLC= کروماتوگرافی مایع با راندمان بالا، GC-MS = گاز کروماتوگرافی مجهز به آشکارساز جرمی، LC-MS = کروماتوگرافی مایع با آشکارساز جرمی، AA = جذب اتمی شعله‌ای، GFAA = جذب اتمی با کوره گرافیتی، ICP = پلاسمای جفت شده القایی، ICP/MS = پلاسمای جفت شده القایی مجهز به آشکارساز جرمی، UV-VIS Spectrometr = طیف‌سنجی در دامنه فرابنفش-مرئی، Ion Chromatography = یون کروماتوگرافی، FT-IR = طیف‌سنجی مادون قرمز تبدیل فوریه، XRD = پراش اشعه ایکس، PCM = میکروسکوپ تباین نوری

در انتخاب یک روش مناسب برای تعیین مواجهه شغلی، پاسخ به پرسش‌هایی به‌شرح زیر می‌بایست مورد توجّه قرار گیرد:

سؤال شماره ۱- چه معیارهایی برای انتخاب روش توسط مسئولین می‌بایست مورد توجّه قرار گیرد؟

پاسخ: انتخاب روش می‌بایست توسط گروه تخصصی و با در نظر گرفتن معیارهای اعتباربخشی از قبیل دقّت، صحّت، حساسیت، انتخاب‌پذیری، پایداری در برابر مداخله‌گرها، زمان تجزیه و تحلیل، در دسترس بودن تجهیزات و هزینه صورت گیرد.

سؤال شماره ۲- با توجّه به امکانات موجود چه روش‌هایی برای آنالیز ترکیب شیمیایی مورد نظر مناسب‌تر است؟

پاسخ: در اینجا کارشناسان مهندسی بهداشت حرفه‌ای باید بررسی کنند که آیا روش موجود قادر به تعیین تراکم در محدوده معین برای آنالیز ترکیب شیمیایی و متناسب با غلظت آن در محیط کار است؟ آیا روش از حساسیت کافی برای تشخیص ترکیب هدف برخوردار می‌باشد؟ همچنین، آیا پارامترهای دقّت یا صحّت روش می‌توانند پاسخگوی نیازهای محل مورد نظر برای ارزشیابی مواجهه شغلی باشند؟

سؤال شماره ۳- از روش‌های در دسترس در محل جغرافیایی مورد نظر، چه سیستم دستگاهی آزمایشگاهی برای آنالیز ترکیب می‌بایست انتخاب گردد؟

پاسخ: جنبه عمل‌گرایی روش آنالیز در محل بسیار مهم است. کارشناسان مهندسی بهداشت حرفه‌ای باید به در دسترس بودن امکانات توجّه داشته باشند و در صورت عدم وجود تجهیزات خاص، می‌توانند از روش‌های ساده‌تر استفاده کنند.

سؤال شماره ۴- آیا ملاحظات هزینه و مدت زمان انجام آزمایش می‌تواند در انتخاب روش اندازه‌گیری مواجهه شغلی تأثیر داشته باشد؟

پاسخ: هزینه آنالیز نمونه‌ها موضوع مهمی در انتخاب روش است و در شرایط مساوی روش‌ها از لحاظ پارامترهای اعتبار بخشی، می‌بایست روش ارزان‌تر انتخاب شود.

سؤال شماره ۵- آیا روش در دسترس می‌تواند ویژگی‌های لازم را برای آنالیز ترکیب هدف داشته باشد؟

پاسخ: برای اظهار نظر در مورد این سؤال، روش در دسترس می‌بایست بر اساس نورم‌های متعارف بررسی گردد و سپس اعلام نظر شود.

سؤال شماره ۶- آیا اقدامات اولیه جهت آماده‌سازی نمونه‌ها می‌تواند در صحّت یا دقّت روش آنالیز اثرگذار باشد؟

پاسخ: آماده‌سازی نمونه‌ها باید به‌گونه‌ای انجام شود که هیچ‌گونه مداخله‌ای در مراحل آنالیز ایجاد نکند. به‌عنوان مثال، وجود ذرات معلق در نمونه برای برخی سیستم‌های آنالیز دستگاهی، مانند روش‌های کروماتوگرافی و طیف‌سنجی جذب و نشر اتمی، بسیار مخرب است. این موضوع برای سیستم‌های دستگاهی طیف‌سنج نوری نیز مداخله‌گر مهمی محسوب می‌شود. از این رو، جهت آماده‌سازی نمونه‌ها برای آنالیز، انجام فیلتراسیون یا سانتریفیوژ آنها توصیه می‌شود.

سؤال شماره ۷- آیا تراکم نمونه می‌بایست در امکان‌سنجی انتخاب روش در نظر گرفته شود؟

پاسخ: به‌طور معمول، در روش‌های استاندارد ارائه شده توسط سازمان‌های NIOSH و OSHA، دامنه تراکم نمونه به‌طور دقیق ذکر می‌شود. کارشناس باید بر اساس معیارهای حساسیت، دامنه خطی نمونه‌های استاندارد و حد آستانه مجاز تماس شغلی، روشی با قابلیت نمونه‌برداری و آنالیز مناسب را انتخاب نماید.

سؤال شماره ۸- نورم‌های قابل قبول برای پارامترهای اعتبارسنجی یک روش نمونه‌برداری و آنالیز روش‌ها چگونه گزارش شده است؟

پاسخ: براساس نورم‌های روش‌های سازمان NIOSH، پارامترهای قابل قبول در جدول ۲-۷ ارائه می‌شود.

جدول ۲-۷) حداقل شاخص‌های قابل قبول برای انتخاب روش

شاخص انتخاب	پارامترهای اعتبار روش
بازیابی روش (Recovery)	> ۷۵٪
حد آشکارسازی کیفی روش (LOD)	≥۰.۱ × OEL
ظرفیت نمونه‌برداری	≥ ۲ × OEL
پایداری نمونه بعد از نمونه‌برداری در اکثر روش‌ها	هفت روز <
سوگیری (Bias) و دقّت (Precision)	≤ ± ۲۵٪

منابع و مراجع اطلاعاتی

Australian Pesticides and Veterinary Medicines Authority. Guidelines for the validation of analytical methods for active constituent, agricultural and veterinary chemical products. October 2004.

Belouafa S, Habti F, Benhar S, Belafkih B, Tayane S, Hamdouch S, Bennamara A, Abourriche A. Statistical tools and approaches to validate analytical methods: methodology and practical examples. International Journal of Metrology and Quality Engineering. 2017; 8:9-19.

Bratinova S, Raffael B, Simoneau C. Guidelines for performance criteria and validation procedures of analytical methods used in controls of food contact materials. Publication office of the European Union. 2009 Oct 31.

Borman P, Elder D. Q2 (R1) validation of analytical procedures: text and methodology. ICH quality guidelines: an implementation guide. 2017 Sep 27:127-166.

Ashley K. NIOSH manual of analytical methods 5th edition and harmonization of occupational exposure monitoring. Gefahrstoffe, Reinhaltung der Luft= Air quality control/Herausgeber, BIA und KRdL im VDI und DIN. 2015.

فصل ۸: فرایند گزینش روش نمونه‌برداری از ترکیبات در فرایند آلاینده‌سنجی محیط کار

۸–۱) مقدمه

یکی از اهداف این کتاب، ارزشیابی مواجهه شغلی کارکنان با ترکیبات شیمیایی است که با انتخاب صحیح روش‌های نمونه‌برداری و آنالیز، در چارچوب روش‌های سازمان‌های NIOSH و OSHA آغاز می‌شود. از کارشناسان محترم خواسته می‌شود که برای رسیدن به این هدف، ابتدا هفت فصل کتاب را به‌طور دقیق بررسی و فراگیرند و سپس دستورات این فصل را به‌شرح زیر پیگیری نمایند.

۸–۱–۱) شناسایی ترکیبات شیمیایی مهم که در مشاغل مختلف

در فصل ۱ کتاب، ۱۹ گروه از ترکیبات شیمیایی بسیار مهم با ذکر اثرات بالقوه آنها و مشاغلی که به‌طور معمول در مواجهه با آنها هستند به‌شرح تقسیم‌بندی زیر مطرح شدند:

۱۱- آزبست، ۲- سیلیس کریستالی، ۳- فلزات سنگین، ۴- ترکیبات آرسنیک، ۵- ترکیبات کادمیوم، ۶- ترکیبات کروم، ۷- ترکیبات سرب، ۸- ترکیبات جیوه، ۹- کروم شش ظرفیتی، ۱۰- حلال‌های صنعتی، ۱۱- مواد نانومتری، ۱۲- ترکیبات پرفلوئورینه، ۱۳- مواد شیمیایی مختل‌کننده غدد درون‌ریز، ۱۴- ترکیبات POP شامل آفت‌کش‌های اورگانوکلره و اورگانوفسفره

ضمن بررسی خصوصیات دسته‌های اصلی ترکیبات شیمیایی مخاطره‌آمیز، می‌توان از برگه SDS ترکیبات شیمیایی برای دستیابی به اطلاعات لازم در مورد مشخصات فیزیکی-شیمیایی و سم‌شناسی استفاده نمود. همچنین اطلاعات لازم در زمینه ترکیب شیمیایی را می‌توان از کتابچه OEL وزارت بهداشت مطالعه کرد.

۸-۱-۲) شناسایی گروه‌های SEG در مراکز شغلی

از آنجاییکه تمام افراد یک حرفه را نمی‌توان مورد ارزشیابی مواجهه شغلی قرار داد، از تعدادی از افراد هر گروه SEG به‌صورت تصادفی نمونه‌برداری می‌شود. در صورت توزیع نرمال داده‌های گروه و همچنین توزیع نرمال داده‌های فردی تعدادی از کارکنان، اطلاعات یافته‌شده به‌عنوان مواجهه کل گروه در نظر گرفته می‌شود (اطلاعات بیشتر در این زمینه در فصل ۹ ارائه شده است). نحوه انتخاب گروه‌های SEG پیش‌تر در فصل ۲ شرح داده شد.

ترکیبات شیمیایی موجود در هر گروه SEG و نوع مواجهه‌های شغلی هر یک از آنها را می‌توان از سایت AIHA و تعدادی دیگر از متون مرجع شناسایی نمود. در مرحله بعدی، با توجّه به ترکیبات شناسایی‌شده، کد H آنها را می‌توان از سیستم GHS استخراج کرد (توضیحات لازم در فصل ۲ آورده شده است).

به‌طور کلی، پس از شناسایی کتابخانه‌ای ترکیبات شیمیایی، فهرست ترکیبات شیمیایی یافته‌شده می‌بایست در محل کار تأیید شده و در صورت نیاز، مواردی به آن افزوده یا از آن کاسته شود. پس از تکمیل فهرست ترکیبات شیمیایی، باید SDS ترکیبات را دانلود کرده و اطلاعات بیشتری از آنها که شامل آگاهی از کد بهداشتی ترکیبات (H Code) در چارچوب موازین GHS است، استخراج نمود. کدهای ترکیبات و اثرات بالقوه آنها بر سلامت در چهار گروه اصلی در فصل ۲ ذکر شده است.

از نتایج ارزیابی کیفی مواجهه شغلی و یا ارزیابی ریسک کیفی مواجهه کارکنان که مراتب آن در فصول ۳ و ۴ آورده شده است، می‌توان در خصوص الزام به ارزشیابی مواجهه شغلی کارکنان اظهار نظر نمود که می‌بایست در قدم‌های بعدی مورد توجّه قرار گیرد.

۸–۱–۳) کسب اطلاعات لازم برای نمونه‌برداری و آنالیز نمونه‌های افراد در گروه‌های SEG

با تشخیص لزوم ارزشیابی مواجهه شغلی کارکنان در مشاغل مختلف و مشخص شدن ترکیبات شیمیایی، بر اساس محتویات فصول ۵ الی ۷، باید به روش‌های نمونه‌برداری و آنالیز ترکیبات مورد نظر دست یافت. به‌طور کلی، جدول راهنمای ۱-۸، خلاصه مطالب سه فصل ذکر شده را برای انواع ترکیبات شیمیایی در فازهای گاز و بخار، آئروسل‌ها به شکل میست، دمه، ذرات میکرونی جامد و ذرات لیفی شکل ارائه می‌دهد.

جدول ۱-۸) اطلاعات اولیه برای انتخاب نمونه‌بردار، آماده‌سازی و آنالیز انواع ترکیبات شیمیایی

ترکیب شیمیایی	بستر نمونه‌برداری در اکثر موارد	شرایط حمل، مدت زمان نگهداری و آماده‌سازی نمونه	روش آنالیز و اعتبار روش*
ترکیبات آلی فرار VOC در فاز گاز و بخار	**لوله جاذب نمونه‌بردار ویژه ترکیب**	**درپوش لوله‌های جاذب بعد از نمونه‌برداری گذاشته می‌شود و ترجیحاً در مدت زمان دو هفته و در داخل یخدان به آزمایشگاه منتقل می‌شوند. روش‌های واجذب در اکثر موارد به شیوه شیمیایی هستند و در شرایط خاص از واجذب حرارتی نیز استفاده می‌شود.**	**با ستون‌های ویژه ترکیبات برخی از آشکارسازهای انتخابی برای دستگاه GC عبارتند از: FID، ECD، PID و MS**
ترکیبات شیمیایی آلی و معدنی در فاز مایع	**جمع‌آوری نمونه‌ها بر روی فیلترهای ویژه و یا واسطه‌های جاذب خاص و در شرایطی استفاده از سیستم مرکب فیلتر و واسطه‌های جاذب خاص**	**انتقال فیلتر کاست یا واسطه‌های جاذب به آزمایشگاه (ترجیحاً در دمای کم) صورت می‌گیرد. فیلتراسیون محلول قبل از تزریق در دستگاه آنالیزور و آنالیز در عرض چند روز به روش استخراج با حلال ویژه و یا با استفاده از فاز متحرک انجام می‌شود.**	**HPLC مجهز به یکی از آشکارسازهای فلوئورسانس، یون‌کروماتوگرافی و آشکارساز هدایت‌سنج و یا در صورت لزوم استفاده از آشکارساز MS، اسپکتروفتومتر UV –Vis**
میست روغن یا آب و روغن به‌صورت میست	**جمع‌آوری نمونه‌های توراسیک یا ذرات کلی از میست روغن با آب (MWFs) با استفاده از فیلتر PTFE و نمونه کاست چند طبقه‌ای.**	**نمونه‌ها در داخل کاست یا در یک ویال تحت شرایط برودت به آزمایشگاه انتقال داده شده و توسط حلال‌های آلی شسته می‌شوند و سپس به‌صورت وزن‌سنجی دقیق آنالیز می‌شوند.**	**نمونه‌های MWFs پس از خشک شدن با ترازوی دارای حساسیت توزینی برابر با میکروگرم، توزین شده و پس از استخراج توسط حلال‌های سه‌گانه، مجدداً توزین می‌گردد و از تفاضل این مقادیر، مقدار روغن محاسبه می‌شود.**

	نمونه‌برداری از میست روغن بدون آب با استفاده از فیلترهای MCE، PVC، PTFE و نمونه‌بردار IOM و یا کاست سه طبقه‌ای.	نمونه‌های منحصر به میست روغن می‌بایست با حلال استخراج و سپس آنالیز شوند. برای آنالیز میست روغن، می‌بایست در یک ویال کوچک نمونه‌ای از روغن مورد استفاده به آزمایشگاه ارسال شود.	در صورت نبود رطوبت بر روی فیلتر، روغن نمونه‌برداری شده می‌تواند توسط دستگاه IR و یا در شرایط بهتر با دستگاه FT-IR آنالیز گردد. لازم به یادآوری است که محلول‌های استاندارد می‌بایست از روغن فیلتر شده محل نمونه‌برداری ساخته شوند.
آئروسل‌های فلزات در فاز ذرات میکرونی و یا دمه	جمع‌آوری دمه بر روی کاست فیلتر و یا هد IOM و فیلترهای MCE و PVC	نمونه‌ها پایدار هستند ولی بهتر است در اسرع وقت آماده‌سازی و آنالیز شوند. هضم اسیدی فیلترها با اسیدهای غلیظ HNO_3، HCl، H_2O_2 و در مواردی توسط مواد قلیایی انجام می‌شود.	یکی از دستگاه‌های طیف‌سنجی جذب یا نشر اتمی و در بهترین وضعیت دستگاه ICP استفاده می‌شود
اقسام گرد و غبارهای حاوی سیلیس کریستالی** و ذرات معلق میکرونی	نمونه‌برداری با استفاده از فیلتر PVC در نمونه‌بردار سیکلون	نمونه‌برداری توسط سیکلون انجام می‌گردد. این نمونه‌ها پایدار هستند و در داخل کاست به آزمایشگاه منتقل می‌شوند. آماده‌سازی به‌صورت سوزاندن همراه با KBr انجام شده و سپس در قالب و زیر پرس به‌صورت دیسک برای آنالیز، آماده‌سازی می‌شوند.	از دستگاه IR و یا سیستم پیشرفته‌تر آن به‌صورت دستگاه FT-IR برای آنالیز استفاده می‌شود.
الیاف آزبست و سایر الیاف لیفی شکل با نسبت طول به عرض ≤ ۳	نمونه‌برداری توسط فیلتر MCE و هد نمونه‌بردار ویژه دالانی	نمونه‌برداری بر روی فیلتر جایگذاری شده در فیلتر هولدر دالانی به قطر ۲۵ میلی‌متر انجام می‌شود و در خاتمه نمونه‌بردار بسته شده و در یک بستر مناسب بسته‌بندی و به آزمایشگاه ارسال می‌شوند. آماده‌سازی نمونه‌ها به‌صورت شفاف‌سازی فیلترهای MCE توسط بخار استون انجام می‌شود.	فیلتر شفاف‌سازی شده روی لام زیر میکروسکوپ فاز کنتراست قرار داده می‌شود تا شمارش الیاف انجام گیرد.

* = بسیار مهم است که بعد از انتخاب روش از سازمان‌های NIOSH و OSHA، اعتبار آنها مورد بررسی قرار گیرد.

** = آنالیز به روش XRD ارجح است ولی دسترسی به این روش در کشور محدود است.

در جدول شماره ۱-۸، اقسام ترکیبات شیمیایی در فازهای مختلف ارائه شده است. بر اساس شکل فیزیکی ترکیبات، نحوه نمونه‌برداری آنها توسط نمونه‌بردارهای مختلف در ستون دوم ذکر گردیده است. در ستون سوم، نحوه حمل نمونه‌ها و آماده‌سازی آن قید شده و در ستون چهارم، با توجّه به ماهیت فیزیکی و شیمیایی ترکیب، نحوه آنالیز آنها به‌طور منطقی و علمی با توجّه به مطالب ذکر شده در فصول ۵، ۶ و ۷ بیان گردیده است.

نمونه‌برداری از ترکیبات آلی فرار با فشار بخار بیشتر از ۱ میلی‌متر جیوه ($VP > 1$ mmHg) متفاوت از ترکیبات آلی با (با فشار بخار متوسط و کم) انجام می‌شود و نحوه انتقال این نمونه‌ها از محل نمونه‌برداری به آزمایشگاه نیز متفاوت است. با توجّه به ماهیت شیمیایی این ترکیبات، به روش آنالیز گازکروماتوگرافی با آشکارسازهای ویژه نیاز خواهد بود.

ترکیبات شیمیایی آلی و معدنی در فاز مایع بر روی فیلترهای ویژه‌ای نمونه‌برداری می‌شوند. پس از اتمام فرایند نمونه‌برداری، نمونه‌های برداشته شده استخراج می‌شوند و پس از صاف کردن به‌منظور حذف ذرات احتمالی، حجم مشخصی (معمولاً ۵۰ میکرولیتر) از آنها به دستگاه HPLC مجهز به ستون‌های ویژه و آشکارسازهای خاصی مانند آشکارساز هدایت‌سنجی برای یون‌های اسیدی و قلیایی تزریق می‌شود. در نهایت، غلظت ترکیب با استفاده از پیک خروجی و بر مبنای خط کالیبراسیون تهیه شده، تعیین مقدار می‌گردد.

میست‌های ترکیبات روغن نیز با کاربرد فیلترهای مخصوص نمونه‌برداری و با حلال‌های آلی استخراج می‌شوند و سپس نمونه‌های فیلتر شده از طریق دستگاه اسپکتروفتومتر IR و یا ترجیحاً توسط FT-IR به‌صورت کمّی و کیفی تعیین مقدار می‌شوند. نمونه‌های میست روغن همراه با آب (MWFs)، خشک و توزین می‌شوند و سپس به‌منظور حذف روغن با حلال‌های مختلف شسته می‌شوند و در نهایت به شیوه وزن‌سنجی آنالیز می‌شوند.

نمونه‌برداری از آئروسل فلزات (به‌صورت تنفسی و استنشاقی) موجود در فرایندهایی از قبیل استخراج، ذوب فلزات و جوشکاری، توسط نمونه‌بردار مناسب در منطقه تنفسی کارکنان برداشته می‌شود. روال آماده‌سازی نمونه‌ها

به‌صورت هضم فیلتر با استفاده از اسیدهای غلیظ مختلف و در موارد خاصی با استفاده از قلیاهای مختلف انجام می‌شود. آنالیز دستگاه نسبت به امکانات موجود در آزمایشگاه‌های محل می‌تواند با طیف‌سنجی جذب یا نشر اتمی و یا طیف‌سنج جذب اتمی- پلاسمای جفت شده القایی انجام شود.

فرق نمونه‌برداری آئروسل‌های فلزات (در حد میکرون) با دمه فلزات (اکثراً در حد کوچکتر از یک میکرون) در امکانات نمونه‌برداری از آنها است. برای نمونه‌برداری از ذرات تنفسی قابل تنفس[1] با اندازه قطری معادل ۱۰ الی ۳۰ میکرون از هد نمونه‌برداری IOM و برای نمونه‌برداری از ذرات استنشاقی[2] در اندازه‌های ۱ الی ۱۰ میکرون از هد فیلتر سیکلون استفاده می‌شود. به‌طور کلی برای دمه فلزات با اندازه کمتر از ۱ میکرون از کاست سه مرحله‌ای و فیلتر MCE یا PVC با قطر ۳۷ mm و اندازه تخلخل ۰.۸ µm استفاده می‌شود. لازم به‌ذکر است اخیراً چندین مقاله جدید در مورد چسبیدن مواد بر روی کاست فیلتر منتشر شده است. از این‌رو توصیه شده است برای پیشگیری از آلودگی نمونه‌ها، کاست فیلترها قبل از نمونه‌برداری شسته و به‌طور کامل پاک شوند و ترجیحاً از فیلتر هولدر IOM به‌عوض کاست فیلتر استفاده شود.

یکی از روش‌های آنالیز دستگاهی برای آئروسل‌های سیلیس کریستالی، دستگاه طیف‌سنج مادون قرمز است که اخیراً ساخت آن روند تکاملی داشته است. شکل پیشرفته این دستگاه به‌صورت FT-IR می‌باشد. البته روش استاندارد طلایی برای تعیین مقدار سیلیس کریستالی، به‌صورت پراش اشعه ایکس است که این روش در کشورمان معمولاً به‌صورت کیفی نمونه‌ها را آنالیز می‌کند و قادر به تعیین کمّی نمونه نمی‌باشد. در مقالات اخیر، روش FT-IR برای آنالیز سیلیس کریستالی در کشورمان استفاده شده است که در فصول قبلی به‌تفصیل بررسی شده است. در این روش، نمونه‌برداری با فیلتر PVC در فیلتر هولدر سیکلون انجام می‌شود و سپس فیلتر به‌آرامی در کوره با ۳۰۰ میلی‌گرم KBr سوزانده شده و با مخلوط پودری هموژنیزه می‌شود. سپس پودر همگن شده در

[1] Inhalable

[2] Respirable

داخل قالب و زیر دستگاه پرس به دیسک‌های شفاف با قطر ۱۰ میلی‌متر تبدیل می‌شود و در دستگاه FT-IR به‌صورت کیفی و کمّی آنالیز می‌گردد (برای اطلاعات بیشتر به فصل ۶ مراجعه شود).

با توجّه به اهمیت کاربرد آزبست و سایر الیاف در صنایع مختلف، روش نمونه‌برداری از الیاف با استفاده از نمونه‌بردار فیلتر قرار گرفته در هولدر ویژه دالانی و فیلتر MCE انجام می‌شود. فیلتر سپس بر روی لام شیشه‌ای تمیز قرار می‌گیرد و به کمک جریان بخارات استون شفاف‌سازی می‌شود. الیاف آزبست موجود بر روی فیلتر توسط میکروسکوپ فاز کنتراست شمرده می‌شوند و با استاندارد مربوطه مقایسه می‌گردند (برای اطلاعات بیشتر به فصل ۶ مراجعه شود).

همان‌طور که ملاحظه می‌شود، اطلاعات کلی در رابطه با نمونه‌برداری و آنالیز برخی ترکیبات در جدول ۱-۸ ارائه شده است. با این وجود، توصیه می‌شود که روش دقیق نمونه‌برداری و آنالیز برای هر ترکیب بر اساس یکی از روش‌های مصوب سازمان‌های NIOSH و OSHA انتخاب گردد. با توجّه به مطالعه جدول راهنمای ۱-۸، خواننده مطالب باید تا حد خوبی روش نمونه‌برداری و آنالیز ترکیبات مورد نظر خود را تشخیص دهد و برای تأیید تشخیص خود می‌تواند به لینک‌های زیر مراجعه نماید:

1- https://www.skcinc.com/samplingguide/osha
2- https://yiqi-oss.oss-cn-hangzhou.aliyuncs.com/aliyun/900101420/solution/213549.pdf
3- https://www.cdc.gov/niosh/npg/default.html

لینک شماره-۱ روش‌های استاندارد NIOSH و OSHA را در بر دارد که می‌توان از طریق آن، روش‌های نمونه‌برداری و آنالیز را برای هر ترکیب دانلود نمود.

لینک شماره-۲ ارائه اطلاعات فشرده نمونه‌برداری و روش آنالیز دستگاهی برای ترکیبات روتین A-Z است که از طرف شرکت SUPELCO تنظیم شده است.

لینک شماره-۳ برای هر ترکیب روش‌های متفاوت استاندارد را ارائه می‌دهد که خواننده با توجّه به متن روش‌ها و اعتبار آنها می‌تواند بهترین روش را از نقطه نظر علمی انتخاب نماید.

لازم به‌ذکر است که در این لینک به خواص فیزیکی و شیمیایی ترکیبات اشاره شده است که برای نمونه‌برداری و آنالیز ترکیبات بسیار مفید است. همچنین این لینک، اطلاعات متفرقه‌ای از جمله وسایل حفاظت فردی مورد نیاز بر اساس تراکم ترکیبات و ضریب ایمنی حفاظت فردی آنها در قالب "Approved Protection Factor" ارائه می‌دهد.

در لینک شماره-۳ علاوه بر هدایت مهندسین بهداشت حرفه‌ای به شماره روش‌های استاندارد برای نمونه‌برداری و آنالیز ترکیبات، به خواص شیمیایی و فیزیکی ترکیب و اطلاعات دیگری از جمله راه‌های جذب مواد شیمیایی، علائم بیماری‌ها و کمک‌های اولیه برای رهایی از مسمومیت حاد توسط آنها نیز اشاره می‌کند.

مثال نخست: ردیابی روش نمونه‌برداری و آنالیز دمه آلومینیوم

با توجّه به ماهیت دمه آلومینیوم و جدول راهنمای ۱-۸ مشخص می‌شود که نمونه‌برداری از دمه آلومینیوم با فیلتر MCE یا PVC با هد نمونه‌بردار IOM انجام می‌شود (در صورتی که آئروسل آلومینیوم مطرح باشد، هد نمونه‌بردار به‌صورت سیکلون خواهد بود). آماده‌سازی نمونه‌ها به‌صورت هضم اسیدی و آنالیز توسط یکی از روش‌های آنالیز دستگاهی طیف‌سنجی اتمی است. در لینک تعیین روش‌ها (لینک ۱ و ۲)، چندین روش آنالیز دمه آلومینیوم به‌شرح OSHA ID121 (طیف‌سنجی جذب اتمی) و روش‌های NIOSH 7300, 7301, 7303 (طیف‌سنجی نشر اتمی) ذکر شده‌اند. لازم به یادآوری است که در برگه اطلاعاتی کتابچه راهنمای سازمان NIOSH، تفاوت روش‌ها اعلام نشده‌اند، ولی خواننده را برای اطلاعات بیشتر به روش‌های مختلف نمونه‌برداری و آنالیز از سازمان‌های NIOSH و یا OSHA (قابل دانلود از لینک شماره ۱) هدایت می‌نماید. با بررسی بیشتر روش‌ها، نمونه‌برداری و آنالیز آلومینیوم به روش OSHA به‌صورت طیف‌سنجی جذب اتمی است و روش‌های دیگر از سازمان NIOSH به‌صورت نشر اتمی پیشرفته به‌صورت پلاسمای جفت است که با توجّه به بررسی و پذیرش هزینه‌های

آنالیز ترکیبات آلومینیوم، می‌توان روش OSHA-121 با کمترین هزینه و یا روش نشر اتمی با بیشترین هزینه را متناسب با معیارهای اعتبارسنجی قابل قبول انتخاب نمود.

مثال دوم: ردیابی روش نمونه‌برداری و آنالیز تولوئن

با توجّه به جدول شماره ۱-۸ و ماهیت تولوئن به‌عنوان یک ترکیب آلی فرار، نمونه‌برداری فعال با استفاده از لوله جاذب و آماده‌سازی نمونه به‌صورت استخراج شیمیایی و همچنین آنالیز توسط دستگاه گاز کروماتوگرافی با آشکارساز FID انجام می‌شود. برای ترکیب تولوئن چندین روش از سازمان NIOSH به شماره‌های ,1500, 1501 3800, 4000 و OSHA 111 ذکر شده‌اند. در برگه اطلاعاتی تولوئن از کتابچه NIOSH با عنوان NIOSH Pocket Guide to Chemical Hazards (لینک شماره-۳)، ضمن دانستن روش‌های اعلام شده، کارشناس با اطلاعات خواص فیزیکی و شیمیایی و سم‌شناسی ترکیب نیز آشنا می‌شود و سپس با در نظر گرفتن و بررسی‌های کارشناسی، بهترین روش با توجّه به امکانات و دسترسی‌های محلی انتخاب می‌شود. فرایند دو روش سازمان NIOSH به شماره‌های ۱۵۰۰ و ۱۵۰۱ شبیه به هم می‌باشد. در هر دو روش از گاز کروماتوگرافی مجهز به آشکارساز FID استفاده می‌شود. هر دو روش برای هیدروکربورها قابل استفاده است ولی روش ۱۵۰۱ به لحاظ داشتن ستون بهتر کروماتوگرافی برای ترکیب تولوئن ارجحیت دارد. روش ۳۸۰۰ نیز یک روش قرائت مستقیم است که مناسب ارزشیابی مواجهه شغلی کارکنان همانند روش سازمان NIOSH ۱۵۰۱ نمی‌باشد.

۸-۱-۳-۱) بررسی و نقد روش‌های انتخاب شده برای ارزشیابی مواجهه شغلی کارکنان

به‌طور کلی روش سازمان‌های NIOSH و OSHA دارای بخش‌های مختلفی هستند که توصیه می‌شود در انتخاب آنها به‌طور دقیق بررسی شوند.

۱- نام و مشخصات ترکیب یا ترکیبات، ساختار مولکولی آنها، وزن مولکولی، کدهای بین‌المللی ترکیبات، تاریخ ارائه روش و کیفیت تصویب روش به‌صورت کامل و یا جزئی

۲- مراتب نمونه‌برداری از قبیل مشخصات نمونه‌بردار، مدت زمان نمونه‌برداری، گذر حجمی نمونه‌برداری، حجم نمونه‌برداری، نحوه انتقال نمونه‌ها و تعداد نمونه‌های شاهد

نکته: یک نکته مهم در نمونه‌برداری این است که در برخی از موارد، با توجّه به حجم و گذر حجمی نمونه‌برداری، مدت زمان نمونه‌برداری برای مقایسه با استاندارد حد تماس شغلی به‌صورت TLV-TWA مناسب نمی‌باشد. برای مثال، در روش ۱۵۰۱ مدت زمان نمونه‌برداری برای ترکیب تولوئن حدود ۱۶ دقیقه است. با توجّه به ماهیت TLV-TWA ترکیب تولوئن، پایش شغلی نمی‌تواند با یکبار نمونه‌برداری در روز انجام شود. همان‌طور که در فصل ۵ کتاب توضیح داده شد، در این‌گونه موارد حداقل تعداد ۴ نمونه‌برداری انجام می‌شود که نمونه‌برداری‌ها با توجّه به مدت زمان نمونه‌برداری‌ها در یک شیفت کاری می‌بایست به‌صورت تصادفی در طول روز انجام شود و میانگین مواجهه در دفعات معین با مقدار TLV-TWA مقایسه شود.

۳- بخش بعدی هر روش مرتبط با اعتبار روش شامل سوگیری، دقّت، صحّت روش به‌صورت درصد بازیابی داده‌ها، حد تشخیص کیفی و کمّی و ویژگی‌های روش برای آنالیز ترکیب است. لازم به‌ذکر است که پارامترهای فوق بر اساس نورم‌های اعلام شده در فصل ۷، قابل قبول تشخیص داده می‌شوند. علاوه بر پارامترهای اعتبار روش، دامنه غلظتی اندازه‌گیری ترکیب نیز نیاز به بررسی بیشتر دارد. برای مثال، در روش شماره ۷۱۰۲ سازمان NIOSH برای آنالیز بریلیوم از دستگاه طیف‌سنج جذب اتمی مجهز به کوره گرافیتی استفاده می‌شود. بر اساس روش مذکور، سازمان NIOSH دامنه غلظتی آنالیز را بین ۰.۰۵ تا ۱ میکروگرم بر نمونه اعلام می‌نماید و با پیش‌فرض نمونه‌برداری از منطقه تنفسی کارکنان به حجم ۱۰۰۰ لیتر با هدف جمع‌آوری بیشتر بریلیوم در حداقل دامنه غلظتی آنالیز، ارزشیابی این ترکیب بسیار سمی در مقایسه با TLV-TWA = ۰.۰۰۰۰۵ $\mu g/m^3$ دشوار است. لازم به‌ذکر است که نمونه‌برداری فردی در حجم زیاد می‌تواند فیلتر را از گرد و غبار متفرقه محیط اشباع سازد و منجر به بار اضافی (بیشتر از ۲ mg) بر روی فیلتر شود و مشکلاتی را در نمونه‌برداری بوجود آورد. از این‌رو انتخاب روش به‌صورت طیف‌سنجی جذب اتمی مجهز به مشعل و کوره گرافیتی ممکن است بهترین انتخاب تلقی نشود. روش

مناسب‌تر برای ارزشیابی مواجهه فردی کارکنان با عنصر بریلیوم یا ترکیبات محلول و غیر محلول بریلیوم، روش NIOSH ۷۳۰۲ با استفاده از روش آنالیز دستگاهی ICP و در محدوده µg/sample ۰.۰۲۵ تا ۷.۶ است.

برای آنالیز عنصر بریلیوم یا ترکیبات محلول و غیر محلول آن با دستگاه ICP در روش NIOSH ۷۳۰۲، نمونه‌های استاندارد بر اساس دامنه جرمی ۰.۰۰۰۰۲۵ تا ۰.۰۰۷۶ میلی‌گرم و در حجم ۲۵ میلی‌لیتر آماده شود. پس از اطمینان از رابطه خطی تراکم و سیگنال دستگاه ICP، دامنه غلظتی به‌صورت کمینه و بیشینه می‌بایست بر اساس روابط مندرج در روش، محاسبه گردد. با توجّه به فرمول محاسباتی غلظت و پیش‌فرض غلظت نمونه‌های شاهد در میزان صفر و دامنه جرم قابل تشخیص در محدوده ۰.۰۰۰۰۲۵ تا ۰.۰۰۷۶ میلی‌گرم و مدت زمان نمونه‌برداری ۸ ساعته، حداقل و حداکثر تراکم به‌شرح زیر محاسبه می‌شود:

$$C = \frac{Cs\ x Vs - Cb\ x\ Vb}{V}$$

که در آن:

Cs غلظت نمونه بر حسب mg/m^3 (mg بر ۲۵ میلی‌لیتر)

Vs حجم نمونه (۲۵ ml)

Cb غلظت شاهد بر حسب mg/m^3 (mg بر ۲۵ میلی‌لیتر)

Vb حجم شاهد (۲۵ ml)

V حجم هوای نمونه‌برداری شده (ml)

$$C_{min} = \frac{(0.000025) - (0)}{1.44}$$

$$C_{max} = \frac{(0.0076\ ) - (0\ )}{1.44}$$

$C_{min} = 0.00001736\ mg/m^3$

$C_{max} = 0.5277\ mg/m^3$

۴- با توجّه به TLV-TWA= ۰.۰۰۰۰۵ mg/m^3، روش ۷۳۰۲ قابلیت اندازه‌گیری عنصر بریلیوم و ترکیبات آن را در محدوده TLV-TWA دارد. علی‌رغم محاسبات فوق، نمونه‌برداری هشت ساعته با گذر حجمی نمونه‌برداری ۳ L/min بدون چالش نمی‌باشد و توصیه می‌شود در آینده از روش پیشرفته‌تری استفاده شود. برای مثال از دستگاه ICP-MS برای نمونه‌برداری و اندازه‌گیری بریلیوم استفاده شود که می‌تواند با حجم نمونه‌برداری کمتر و با حساسیت بیشتر آنالیز را امکان‌پذیر سازد.

۸-۱-۳-۲) ارزشیابی روش‌های ارائه شده از سوی سازمان NIOSH

اطلاعات اعتبارسنجی برای روش‌های سازمان NIOSH اعلام می‌شود تا ضمن پاسخگویی به کارشناسان آزمایشگاه، معیار لازم را برای تمرین و اعتبارسنجی آنالیز ترکیبات در آزمایشگاه‌های محلی در اختیار قرار دهد. اطلاعات اعتبارسنجی روش‌ها توسط نمونه‌های ساخته شده (Spiked Samples) در آزمایشگاه در مقادیر مختلف توصیه شده بر اساس OEL ترکیبات انجام می‌شود. برای مثال سازمان NIOSH برای روش شماره ۷۳۰۲ و بر اساس داده‌های نمونه‌های استاندارد، LOQ بریلیوم را محاسبه نموده و دامنه غلظتی را برای نمونه‌های استاندارد در دامنه LOQ×۳ الی LOQ×۳۰۰ اعلام می‌کند. لازم به‌ذکر است دامنه غلظتی استانداردها برای همه ترکیبات به‌صورت ۳ الی ۳۰۰ برابر LOQ نمی‌باشد و دامنه منطقی آن بر حسب OEL معمولاً بین ۰.۱ تا ۲ برابر LOQ می‌باشد. ضمناً ملاک قضاوت برای برتری روش، پارامترهای اعتبار روش و توضیحات مفید برای تنظیم سیستم آنالیز دستگاهی است (برای اطلاع بیشتر به فصل ۷ مراجعه شود).

۸-۱-۳-۳) شرح روش‌های NIOSH در مورد جزئیات آنالیز دستگاهی

۱- تکنیک‌های مختلفی برای آنالیز ترکیبات استفاده می‌شود که در فصل ۶ و جدول راهنمای ۱-۸ آورده شده‌اند. به‌طور کلی تکنیک‌ها سریعاً رو به پیشرفت هستند. سیستم‌های آنالیز دستگاهی در سه دهه اخیر مجهز

به کامپیوتر برای محاسبات غلظت نمونه شده‌اند. همچنین افزوده شدن دستگاه تزریق‌کننده خودکار قادر است به‌صورت بیست و چهار ساعته به تزریق اتوماتیک نمونه به دستگاه بپردازد که این امر امکان آنالیز نمونه‌ها را به تعداد بسیار زیادتر و با کمترین خطا و حساسیت بیشتر میسر کرده است (برای مثال آنالیز بریلیوم و ترکیبات آن با سیستم ICP).

مطلب دیگر در مورد دستگاه‌های آنالیزور پیشرفته، کاربرد سیستم‌های مرکب[1] است. این دستگاه‌ها اکثراً به اشکال مختلف طیف‌سنجی اتمی و کروماتوگرافی به‌صورت پیوسته با دستگاه آشکارساز جرمی دیده می‌شوند. دستگاه‌های آنالیزور پیشرفته دارای حساسیت بیشتری برای تشخیص ترکیبات و آنالیز آنها می‌باشند.

۲- اطلاعات بعدی در مورد آنالیز ترکیب هدف و آماده‌سازی نمونه برداشته شده مربوط به شرایط تنظیم و تجهیزات لازم برای آنالیز دستگاهی است. برای مثال، تنظیمات دستگاه طیف‌سنجی یا کروماتوگرافی و همچنین تجهیزات جنبی دستگاه‌ها مانند ستون‌های کروماتوگرافی باید به‌طور دقیق انجام شود. لازم به‌ذکر است که برای جداسازی صحیح انواع ترکیبات مختلف در کروماتوگرافی‌ها، نیاز به ستون‌های اختصاصی است که متناسب با نوع ترکیب شیمیایی برای آنالیز می‌بایست تعویض گردند.

۳- رعایت دستورالعمل نمونه‌برداری در تمام شرایط، به‌ویژه در شرایطی که تراکم بالای ترکیبات و رطوبت زیاد هوای محیط کار وجود دارد، الزامی است. اطمینان از نمونه‌برداری صحیح برای پیشگیری از شکست جذب سطحی بسیار اهمیت دارد. برای مثال، در روش ۱۵۰۱ سازمان NIOSH و در نمونه‌برداری و آنالیز چندین ترکیب به‌طور همزمان، شکست جذب سطحی برای تمام ترکیبات می‌بایست در حداقل میزان قابل قبول باشد تا دقت نتایج تضمین شود.

---

[1] Hyphenated Techniques

۴- در گام بعدی، بررسی روش‌ها به‌منظور شناسایی مداخله‌گرهای آنالیز، به‌ویژه در روش‌های طیف‌سنجی اتمی، ضروری است. در شرایط حضور مداخله‌گرها در فرایند طیف‌سنجی، انتخاب طول موج‌های مناسب و جایگزین باید توسط کارشناسان متخصص انجام شود. همچنین، با در نظر گرفتن میزان جذب نمونه‌های شاهد، اصلاح مقدار جذب و نشر زمینه‌ای در آنالیز ترکیبات انجام گردد.

۵- دستگاه‌های آنالیزور به اشکال مختلف می‌بایست هر ساله توسط کارشناس متخصص آنالیز دستگاهی برای بهترین حساسیت کالیبره شود.

۶- جایگزینی روش‌های روتین امروزی با روش‌های مدرن از مطالب مهمی است که در آینده باید در نظر گرفته شود. در این جا فقط اطلاعات مختصری برای اطلاع کارشناسان از تکنیک‌های مدرن بازگو می‌شود. برای مثال سیستم SIFT-MS از سیستم‌های جدید طیف‌سنجی و مخفف Selected Ion Flow Tube Mass Spectrometry است که به‌صورت یک فناوری جدید با آشکارساز جرمی گزارش شده است. این سیستم جدید، آنالیز نمونه‌های هوا را بدون هیچ‌گونه آماده‌سازی و با حساسیت بالا امکان‌پذیر می‌نماید و تجزیه و تحلیل تمام نمونه‌های هوا را ارائه می‌دهد. برای اطلاعات بیشتر می‌توان به آدرس سایت‌های زیر مراجعه نمود.

1- SIFT-MS: A New Perspective on Monitoring of Occupational Chemical Exposure
2- https://www.sift-ms.com/

۷- یکی از بخش‌های روش‌های استاندارد، کاربرد مواد شیمیایی با درجه خلوص عالی است. برای مثال، در تجزیه ترکیبات به روش‌های طیف‌سنجی اتمی و کروماتوگرافی، استفاده از مواد شیمیایی با کیفیت عالی در قالب مواد جامد، مایع و گاز الزامی است. از این‌رو توصیه می‌شود که قبل از استفاده از مواد شیمیایی، درجه خلوص ترکیبات بررسی شود. در سال‌های اخیر، با توجّه به محدودیت واردات مواد شیمیایی با کیفیت از کشورهای اروپایی، آزمایشگاه‌ها با چالش‌هایی مواجه شده‌اند و امید می‌رود که همکاران دانشگاهی و دانش‌پژوهان شرکت‌های دانش‌بنیان علمی کشور در زمینه تولید مواد شیمیایی با درجه خلوص مناسب اقدام نمایند.

۸- یکی دیگر از ارکان روش‌های مصوب، کاربرد دستگاه‌های آزمایشگاهی است. شایان توجّه است که با تلاش‌های ارزنده کارشناسان در زمینه ساخت پمپ‌های نمونه‌بردار فردی و لوله‌های جاذب برای نمونه‌برداری‌ها، موفقیت‌های خوبی در کشور به دست آمده است. در مورد دستگاه‌های آنالیزور و به‌روز کردن دستگاه‌های فعلی، لازم است که شرکت‌های دانش‌بنیان نیز در این زمینه وارد عمل شوند و دستگاه‌های مدرن آزمایشگاهی را در کشور تولید نمایند. خوشبختانه کشور ایران در زمینه تولید وسایل شیشه‌ای آزمایشگاهی به خودکفایی نسبی رسیده است.

۹- از ملاحظات ویژه‌ای که مکرراً در روش‌های مصوب خواسته شده است، موضوع کاربرد صحیح مواد شیمیایی در آزمایشگاه و تأمین سلامت پرسنل است. در این زمینه، لازم است که قبل از شروع عملیات آزمایشگاهی، SDS هر یک از مواد شیمیایی به‌دست آورده شود و با آگاهی از مخاطرات ترکیبات شیمیایی، اقدامات پیشگیرانه برای اجتناب از بروز اثرات حاد و مزمن آنها در عملیات آزمایشگاهی به‌طور کامل انجام شود. در این راستا، توصیه می‌شود که مراتب انجام کار و تمهیدات ایمنی به‌صورت مکتوب تهیه و به کارشناسان آموزش داده شود. سپس با اجرای اقدامات کنترلی مانند تهویه موضعی و تأمین وسایل حفاظت فردی مناسب (دستکش‌ها، ماسک‌های تنفسی، چشم‌شوی و دوش اضطراری)، عملیات آزمایشگاهی به تدریج شروع گردد.

۱۰- بخش نمونه‌برداری از روش‌های مصوب که از اهم کارهای مهندسین بهداشت حرفه‌ای نیز هست، می‌بایست به‌طور دقیق طبق روش‌های مصوب انجام شود. برای مثال، برای نمونه‌برداری از بریلیوم و ترکیبات آن طبق روش ۷۳۰۲، اقدامات به شرح زیر می‌بایست انجام شود:

الف) هد نمونه‌بردار فردی IOM در اتصال به پمپ نمونه‌بردار فردی با گذر حجمی ۳ L/min کالیبره شود.

ب) پمپ به مدت هشت ساعت به کارگر متصل و راه‌اندازی شده و طبق دستور روش نمونه‌برداری عمل می‌کند. در پایان، کاست نمونه‌بردار به آزمایشگاه ارسال می‌شود.

ج) آماده‌سازی نمونه‌ها بر اساس روش‌ها از اهمیت زیادی برخوردار است. برای مثال، در روش ۷۳۰۲، فیلترهای نمونه مورد و کنترل باید با دقت از کاست فیلتر هولدر خارج شده و به ظرفی از جنس PTFE منتقل شوند. همچنین داخل کاست باید با دستمال سلولزی مرطوب شده با آب دیونیزه تمیز شود و سپس به ظرف PTFE اضافه گردد. پس از آن، ۱۰ میلی‌لیتر اسید نیتریک غلیظ به ظرف اضافه شده و فیلتر و دستمال با فرآیند حرارت‌دهی هضم اسیدی می‌شوند. هضم اسیدی باید با حرارت دادن در دمای ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۰ دقیقه در داخل دستگاه مایکروفر انجام شود تا نمونه تقریباً خشک شود. پس از سرد شدن، حجم نمونه با آب دیونیزه به ۲۵ میلی‌لیتر رسانده می‌شود.

منابع و مراجع اطلاعاتی

Lucas L, Whittaker C, Bailer AJ. Visualizing the NIOSH Pocket Guide: Open-source web application for accessing and exploring the NIOSH Pocket Guide to Chemical Hazards. Journal of occupational and environmental hygiene. 2024 Jan 2;21(1):47-57.

Hydrocarbons aromatic: Method 1501, NIOSH Manual of Analytical Methods (NMAM), 4th ed., Issue 3, 2003, DHHS (NIOSH) Publication.

Chemical analysis branch handbook: Workplace and biological monitoring exposure analysis. 9th edition. Australia.

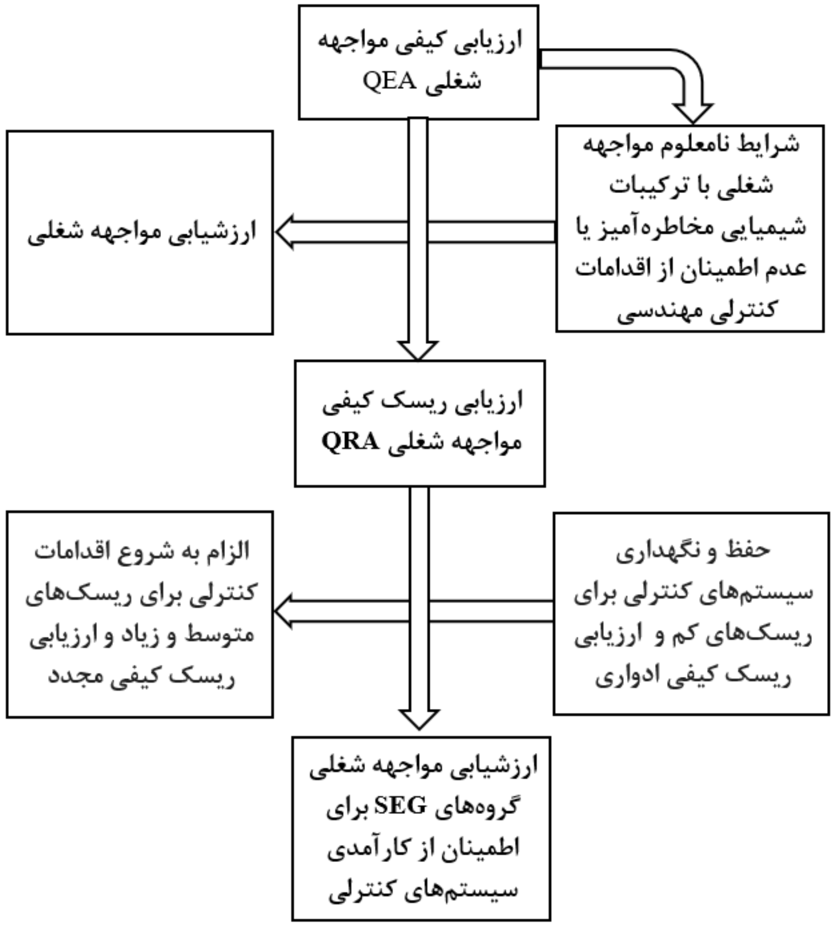
National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH), NIOSH Manual of Analytical Methods 7302. Elements by y Microwave Digestion. 2014. Cincinnati, Ohio, USA.

فصل ۹: راهبردهای پایش برای ارزشیابی مواجهه شغلی بهداشتی کارکنان در محیط‌های شغلی

۹–۱)   مقدمه

در فصل‌های ۳ و ۴ مطالبی در خصوص مراتب ارزیابی کیفی مواجهه (QEA) و همچنین ارزیابی ریسک کیفی (QRA) کارکنان شاغل در بخش‌های مختلف شغلی ارائه شد. هدف از این دو فصل، غربالگری کارکنان در گروه‌های SEG برای ارزشیابی مواجهه شغلی با ترکیبات شیمیایی است که می‌تواند سلامت کارکنان را به خطر بیندازد. به‌عبارت دیگر، روش‌های ارزیابی کیفی می‌توانند به‌طور کارآمدی حجم اقدامات ارزشیابی مواجهه شغلی را کاهش دهند و کارشناسان مهندسی بهداشت حرفه‌ای را به سمت اجرای اقدامات کنترلی، به‌عنوان اهداف اصلی این رشته، هدایت کنند. به‌طور کلی، روش‌های ارزیابی ریسک در کلیه کشورها پیش از ارزشیابی مواجهه شغلی کارکنان گروه‌های SEG به کار برده می‌شود، زیرا این ارزشیابی نیازمند استفاده از روش‌های استاندارد نمونه‌برداری و آنالیز با هزینه‌های قابل‌ملاحظه است. امّا متأسفانه روش‌های ارزیابی ریسک کیفی یا ارزیابی کیفی مواجهه کمتر در کشور مورد استفاده قرار می‌گیرد و در برخی موارد، روش‌های به‌کار گرفته‌شده قدیمی بوده و همسو با یافته‌های دو دهه اخیر نیست.

همان‌طوری که در فصول ۳ و ۴ ذکر شده است، در برخی موارد، کاربرد روش‌های QEA یا QRA به‌تنهایی نمی‌تواند وضعیت مواجهه کارکنان در مشاغل مختلف را به‌طور دقیق روشن نماید. در این شرایط، انجام ارزشیابی مواجهه شغلی از طریق پایش فردی کارکنان با استفاده از روش‌های استاندارد نمونه‌برداری و آنالیز و مقایسه با استاندارد حد تماس شغلی ضرورت پیدا می‌کند. به‌طور کلی، روش‌های QEA و QRA دو روش مکمل یکدیگر تلقی می‌شوند که می‌توانند به‌طور مستقل یا به‌صورت ترکیبی به‌کار برده شوند (شکل ۹-۱).



شکل ۱-۹) سلسله مراتب ارزیابی ریسک کیفی و ارزشیابی مواجهه شغلی کارکنان

به‌طور کلی و بر طبق روند جهانی، رویکرد ارزشیابی مواجهه شغلی بر اساس توصیه‌های ارزیابی ریسک کیفی به مرحله اجرا گذاشته می‌شود که با توجّه به نتایج آن، برنامه جامع ارزشیابی مواجهه شغلی در موارد لازم بر اساس روش‌های استاندارد نمونه‌برداری فردی از کارکنان و سپس آنالیز و مقایسه داده‌ها با استانداردهای تماس شغلی به اجرا درمی‌آید (جدول ۹-۱ و جدول ۹-۲).

جدول ۱-۹) نتایج ارزیابی کیفی مواجهه و اقدامات مرتبط با آن

نتایج ارزیابی کیفی مواجهه	توصیه‌های لازم برای اقدامات کنترلی و لزوم ارزشیابی مواجهه شغلی
۱- ریسک غیر قابل ملاحظه است	۱-۱- حفظ و نگهداری سیستم‌های کنترلی ۱-۲- انجام فرایند ارزیابی کیفی مواجهه در صورت تغییر در وضعیت تولید ۱-۳- آموزش بدو استخدام و حین خدمت برای کارکنان
۲- ریسک قابل ملاحظه است ولی در حال حاضر به صورت مناسب کنترل شده است	۲-۱- حفظ و نگهداری سیستم‌های کنترلی ۲-۲- به حداقل رساندن مواجهه‌های شغلی ۲-۳- ارزیابی مجدد ارزیابی کیفی مواجهه در صورت تغییر وضعیت کار ۲-۴- ارزشیابی مواجهه شغلی مواجهه کارکنان با استفاده از روش‌های استاندارد و مقایسه با حدود مجاز مواجهه ۲-۵- برنامه آموزشی قبل از استخدام و حین خدمت برای کارکنان
۳- ریسک کارکنان قابل ملاحظه و کنترل نشده است	۳-۱- بررسی توقف فعالیت کارگاه ۳-۲- شناسایی و به‌کارگیری سریع روش‌های کنترلی و پیشگیری ۳-۳- انجام مجدد ارزیابی کیفی مواجهه بعد از اجرای اقدامات کنترلی ۳-۴- در صورت وجود ریسک بعد از اقدامات کنترلی انجام ارزیابی کیفی مواجهه
۴- وضعیت ریسک قابل تشخیص نمی‌باشد	۴-۱- انجام بررسی‌های جدید و مشاوره با متخصصین تا رسیدن به درجات ۱ تا ۳ از فرایند ارزیابی کیفی مواجهه ۴-۲- اقدامات کنترلی لازم برای به حداقل رساندن مواجهه شغلی ۴-۳- انجام ارزیابی ریسک کیفی و در صورت لزوم ارزشیابی مواجهه شغلی مواجهه کارکنان با استفاده از روش‌های استاندارد و مقایسه با حدود مجاز مواجهه ۴-۴-آموزش حین خدمت برای کارکنان

جدول ۲-۹) نتایج ارزیابی ریسک کیفی و اقدامات مرتبط با آن

نتایج ارزیابی ریسک کیفی	توصیه‌های لازم برای اقدامات کنترلی و لزوم ارزشیابی مواجهه شغلی
۱- سطح ریسک قابل قبول	۱-۱- ارزیابی ریسک کیفی به‌صورت ادواری سالیانه توصیه می‌شود. ۱-۲- در صورت هر گونه تغییر در فرایند صنعتی، ارزیابی ریسک کیفی می‌بایست سریعاً انجام شود.
۲- سطح ریسک متوسط یا وضعیت نامعلوم	۲-۱- شروع اقدامات کنترلی فوری و سپس ارزیابی مجدد ارزیابی ریسک کیفی تا حصول اطمینان از کاهش سطح ریسک تا درجه قابل قبول، لازم به نظر می‌رسد. ۲-۲- پس از ارزیابی ریسک کیفی مجدد، در صورت کاهش سطح ریسک در حد قابل قبول (ریسک کم)، انجام ارزیابی ریسک کیفی به‌صورت ادواری سالیانه و یا زودتر طبق نظر کارشناسان لازم است. ۲-۳- در صورت عدم کاهش سطح ریسک کیفی، ارزشیابی مواجهه شغلی با استفاده از روش‌های استاندارد نمونه‌برداری، آنالیز و مقایسه با حدود مجاز مواجهه شغلی ضروری به نظر می‌رسد.
۳- سطح ریسک زیاد یا خیلی زیاد	۴-۱- اصلاح و تغییر فوری در فرآیندهای تولید ۴-۲- جایگزینی محصولات شیمیایی خطرناک با مواد شیمیایی دارای سمیت کمتر ۴-۳- جایگزینی محصولات شیمیایی آلی با مواد دارای فشار بخار کمتر ۴-۴- طراحی و نصب سیستم‌های تهویه صنعتی ۴-۵- ارزیابی ریسک کیفی بعد از انجام اقدامات کنترلی ۴-۶- در صورت کاهش رتبه ریسک گروه SEG در سطح قابل قبول، ارزیابی کیفی مواجهه یا ارزیابی ریسک کیفی هر شش ماه یکبار الزامی است. ۴-۷- در صورت عدم کاهش سطح ریسک، ارزشیابی مواجهه شغلی از طریق نمونه‌برداری و آنالیز با روش‌های استاندارد و مقایسه با استاندارد حد تماس شغلی الزامی است. ۴-۸- در صورت وجود ریسک در این مرحله، اقدامات کنترلی می‌بایست طبق نظر کارشناسان مجرب تا حصول اطمینان از کاهش سطح ریسک تا سطح قابل قبول تجدید نظر گردد.

همان‌طور که در جداول ۱-۹ و ۲-۹ مشاهده می‌شود، موضوع ارزشیابی مواجهه شغلی برای پایش کارکنان معمولاً بعد از اجرای اقدامات ارزیابی کیفی مواجهه و یا ارزیابی ریسک کیفی انجام می‌شود و دارای اهدافی به‌شرح زیر است:

۱- **تماس کارکنان با عوامل شیمیایی، فیزیکی و بیولوژیکی و ارتباط آن با اثرات نهفته زیان‌آور مشخص می‌گردد.**
۲- **سطح تماس شغلی و تغییرات آن در شرایط مختلف زمانی، مکانی و تغییر در سرعت انجام کار، مورد بررسی قرار داده می‌شود.**
۳- **از طریق مقایسه داده‌ها با استاندارد حد تماس شغلی، آسیب‌های احتمالی ناشی از مواجهه شغلی کارکنان تخمین زده می‌شود.**
٤- **اولویت‌بندی اقدامات کنترلی بر اساس داده‌های مواجهه فردی کارکنان انجام می‌شود.**
٥- **پایش شغلی روشی مناسب برای مستندسازی میزان مواجهه‌های کارکنان در طول زمان است.**
٦- **داده‌های پایش فردی می‌تواند توجیه‌کننده مؤثری در مدیریت ریسک و لزوم تخصیص منابع برای اقدامات کنترلی و نظارت‌های بعدی از طرف کارفرمایان باشد.**

فصل ۹ به راهبردهای متفاوت برای بررسی مواجهه شغلی کارکنان می‌پردازد. لازم به ذکر است جزئیات روش‌های استاندارد نمونه‌برداری، آماده‌سازی نمونه‌ها و آنالیز آن‌ها در فصل‌های ۵، ۶ و ۷ کتاب گزارش شده است. در این فصل، راهبردهای نمونه‌برداری به‌عنوان یک رویکرد علمی و اجرایی برای برنامه‌ریزی پایش فردی کارکنان و ارزشیابی مواجهه شغلی ارائه می‌شود. همچنین، روش‌های متداول پایش کارکنان از قبیل نحوه گزینش کارکنان، تعداد آن‌ها برای نمونه‌برداری، آنالیز و مقایسه با استانداردهای حد تماس شغلی مورد بررسی قرار می‌گیرد. در فصل دهم نیز به موضوع تفسیر داده‌های مواجهه شغلی گروه‌های SEG پرداخته می‌شود.

۹–۱–۱) راهبردهای پایش مواجهه فردی کارکنان در گروه‌های SEG

روش‌های پایش فردی کارکنان[1] در مراکز شغلی در دو وضعیت مشاغل روتین و غیر روتین مطرح است. به‌طور کلی، ارزشیابی مواجهه کارکنان در مشاغل روتین به‌مراتب پیچیدگی کمتری دارد، اما عواملی مانند تفاوت فصول سال، باز و بسته بودن درها و پنجره‌ها و بیماری‌های فصلی می‌توانند میزان مواجهه را تحت تأثیر قرار دهند.

۹–۱–۱–۱) رویکرد پایش مواجهه شغلی کارکنان در وضعیت مشاغل روتین

در این بخش رویکردهای مختلف پایش شغلی کارکنان در وضعیت مشاغل روتین به شکل‌های مختلف نمونه‌برداری تصادفی، رویکرد پایش در بدترین وضعیت و روش پایش شغلی آماری، ارائه می‌شود.

۹–۱–۱–۱–۱) رویکرد پایش مواجهه شغلی به شیوه نمونه‌برداری تصادفی

رویکرد پایش مواجهه شغلی به شیوه نمونه‌برداری تصادفی[2] یک راهبرد نمونه‌برداری از جمعیتی با مقادیر متفاوت مواجهه به‌صورت تصادفی است که هیچ پیش فرضی برای توزیع داده‌های آن در نظر گرفته نشده است. در این روش، کارشناسان ملزم به نمونه‌گیری از تعداد کافی از کارکنان برای تشخیص میزان مواجهه جمعیتی هستند که حداقل می‌بایست ٪۱۰ از این افراد از میان کارکنانی انتخاب شوند که در سطح اطمینان ٪۹۵ با بیشترین مقادیر آلاینده مذکور در محیط کار مواجهه دارند. برای این منظور، از فرمول آماری زیر و متغیرهای پارامتر Z، انحراف معیار و سطح اطمینان برای محاسبه تعداد نمونه‌های لازم استفاده می‌شود.

$$\text{تعداد نمونه} = (\text{پارامتر Z})^2 \times \text{انحراف معیار} \times (\text{انحراف معیار} - 1) / (\text{سطح اطمینان})^2$$

[1] Personal Monitoring Strategy
[2] Purely Random Sampling

برای مثال تعداد نمونه لازم برای برآورد میزان مواجهه یک جمعیت با درصد اطمینان ۹۵٪، انحراف معیار معادل ۰.۵ و دامنه اطمینان ۵٪± به‌شرح محاسبه زیر معادل با ۳۸۵ نفر خواهد بود.

تعداد نمونه = $(۱.۹۶)^{۲}\times ۰.۵\times(۱-۰.۵)/(۰.۰۵)^{۲} = ۳۸۵$

جدول ۳-۹) مقدار پارامتر Z بر اساس سطوح اطمینان مختلف

سطح اطمینان	پارامتر Z
۸۰٪	۱.۲۸
۸۵٪	۱.۴۴
۹۰٪	۱.۶۵
۹۵٪	۱.۹۶
۹۹٪	۲.۵۸

یک روش دیگر برای تعیین تعداد نمونه‌ها برای پایش فردی در قالب نمونه‌گیری تصادفی، با شرایط نامشخص بودن وضعیت توزیع داده‌ها، استفاده از جدول ۴-۹ می‌باشد که متناسب با تعداد افراد جمعیت، تعداد نفرات لازم برای نمونه‌برداری را برای حد اطمینان آماری ۹۰٪ مشخص می‌کند. لازم به‌ذکر است که حداقل یک نفر در بین افراد نمونه منتخب می‌بایست از میان ۱۰٪ از جمعیت دارای بالاترین نرخ مواجهه انتخاب شود.

جدول ۴-۹) حداقل تعداد نمونه برای روش پایش تصادفی مواجهه شغلی

گروه شغلی کارکنان	حداقل تعداد نمونه لازم برای پایش مواجهه شغلی
۱	۱
۲	۲
۳	۳
۴	۴
۵	۵
۶	۶
۷	۷
۸	۷

۹	۸
۱۰	۹
۱۱-۱۲	۱۰
۱۳-۱۴	۱۱
۱۵-۱۷	۱۲
۱۸-۲۰	۱۳
۲۱-۲۴	۱۴
۲۵-۲۹	۱۵
۳۰-۳۷	۱۶
۳۸-۴۹	۱۷
۵۰	۱۸

همان‌طور که در جدول ۴-۹ ملاحظه می‌شود، در یک گروه ۱۵ نفری می‌بایست حداقل از ۱۲ نفر به‌صورت تصادفی نمونه‌برداری شود تا بتواند در بردارنده حداقل یک نفر از افراد جمعیت با بیشترین نرخ مواجهه باشد. افراد دارای بیشترین مواجهه عمدتاً در ۱۰٪ از جمعیت مواجهه یافته با ترکیب شیمیایی مورد نظر مشاهده می‌شوند.

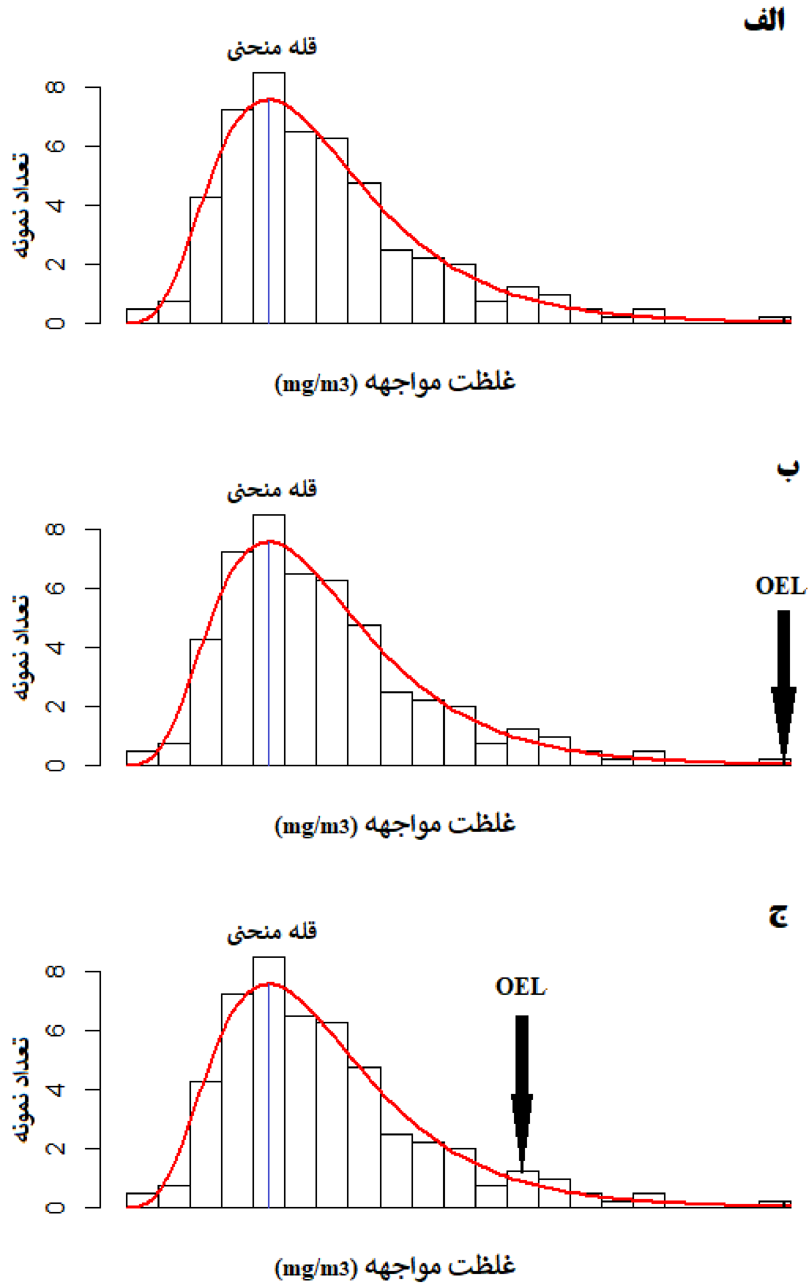
به‌طور کلی جدول ۴-۹ بیان‌کننده حداقل تعداد نفرات لازم برای نمونه‌گیری از یک گروه بزرگ است. لازم به‌ذکر است نمونه‌گیری از جمعیت می‌بایست متناسب با تعداد نفرات ذکر شده امّا به شیوه کاملاً تصادفی انجام گردد.

با توجّه به تعداد زیاد نمونه‌ها در رویکرد پایش شغلی به‌صورت تصادفی، روش‌های آماری دیگری نیز برای کاهش تعداد نمونه‌برداری‌ها، به شرط تأمین میزان کفایت لازم در تصمیم‌گیری‌ها، توصیه شده است که به‌شرح زیر توضیح داده می‌شوند.

۹-۱-۱-۱-۲) رویکرد آماری پایش مواجهه شغلی

سال‌ها تحقیق نشان داده است که داده‌های مواجهه در بسیاری از پایش‌های گروه‌های شغلی SEG، از توزیع نرمال لگاریتمی[1] پیروی می‌کنند. توزیع نرمال لگارتیمی در شکل ۱-۹ نشان داده شده است که با حداقل تعداد نمونه‌ها، شکل منحنی توزیع مواجهه مشابه را به‌صورت زنگوله ای نامتقارن در می‌آورد. محور عمودی و افقی در این شکل به ترتیب نشان دهنده فراوانی نمونه‌ها و غلظت مواجهه (بر حسب mg/m^3) است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود بخش عمده‌ای از مواجهه‌ها در محدوده قله منحنی قرار دارند. مواجهه برخی از نفرات گروه SEG ممکن است به دلایل ویژگی‌های فردی در انجام کار (مانند سرعت عمل در اجرای وظایف محوله) و یا محل انجام کار (وجود پنجره در نزدیکی فضای کاری و غیره) از دیگران متمایز باشد و غلظت مواجهه را به مقادیر کمتر یا بیشتر از مواجهه سایر افراد گروه SEG تغییر دهد. در صورتی‌که داده‌های مواجهه افراد در توزیع نرمال لگاریتمی کمتر از استاندارد حد تماس شغلی باشد، می‌توان نتیجه‌گیری کرد که میزان مواجهه جمعیت به شکل مناسب کنترل شده است (شکل ۱-۹، ب). در صورتی‌که تعدادی از داده‌های مواجهه گروه SEG از مقادیر OEL بیشتر باشد، مواجهه کارکنان در محدوده غیرقابل قبول ارزیابی می‌شود (شکل ۱-۹، ج). به‌طور کلی در مواردی که از رویکرد آماری برای ارزیابی تطابق مواجهه گروه SEG با حدود استاندارد استفاده می‌شود، تعداد نمونه‌های جمع‌آوری شده می‌بایست در حدی باشد که توزیع داده‌ها را به شکل توزیع نرمال لگاریتمی درآورد.

[1] log-normal distribution



شکل ۲-۹) مقایسه نمودار توزیع داده‌ها به صورت نرمال و نرمال لگاریتمی

یک مزیت روش رویکرد آماری این است که با نمونه‌برداری از تعداد محدودی از افراد جمعیت گروه SEG می‌توان به میزان مواجهه افراد مورد مطالعه دست پیدا نمود. بر اساس توصیه سازمان AIHA و با شرط توزیع

نرمال لگاریتمی داده‌ها، معمولاً تعداد ۶ تا ۱۰ نمونه به شیوه تصادفی گرفته می‌شود که برای بررسی آزمون برابری یا نابرابری در صدک ۹۵٪ داده‌های مواجهه شغلی با مقدارOEL کفایت می‌کند. لازم به‌ذکر است که در شرایطی که نتایج اندازه‌گیری نمونه‌های مواجهه شغلی به مقدار OEL نزدیک باشد و یا توزیع داده‌ها در دامنه وسیعی قرار داشته باشد، تعداد ۶ تا ۱۰ نمونه مورد قابل قبول نخواهند بود و به تعداد نمونه بیشتری برای تصمیم‌گیری نیاز خواهد بود.

۹-۱-۱-۱-۳) رویکرد پایش شغلی برای بدترین شرایط موجود

یکی دیگر از رویکردهای پایش شغلی، نمونه‌گیری در بدترین شرایط مواجهه شغلی است. این رویکرد توسط ضابطین قانون و کارفرمایان برای مقایسه میزان مواجهه کارکنان با آلاینده‌های هوابرد محیط کار با استانداردهای OEL انجام می‌شود. در این زمینه، از اطلاعات موجود و قضاوت حرفه‌ای متخصصین برای انتخاب بیشترین نرخ مواجهه شغلی و برنامه‌ریزی برای پایش آن‌ها استفاده می‌شود. اگر نتایج به‌دست‌آمده از نمونه‌ها از مقادیر OEL تجاوز نکند، می‌توان نتیجه‌گیری کرد که میزان مواجهه افراد نمونه و سایر کارکنان کمتر از OEL و در محدوده قابل‌قبول است. تعیین تعداد نمونه‌ها وابسته به عدم اطمینان برای تشخیص بدترین سناریوهای پایش کارکنان است.

در رویکرد پایش فردی در بدترین شرایط مواجهه، معمولاً یک یا دو نمونه‌برداری از کارکنان گروه SEG با بیشترین میزان مواجهه شغلی انجام می‌شود، اما در شرایط خاص، تعداد نمونه‌های بیشتری در نظر گرفته می‌شود. به‌عبارت دیگر، این افراد در برخی روزها یا در حین انجام کار دارای بیشترین تماس شغلی هستند. در صورتی‌که داده‌های مواجهه شغلی این افراد قابل‌قبول باشند، می‌توان نتیجه گرفت که تماس شغلی سایر کارکنان در گروه SEG نیز در محدوده قابل‌قبول است. رویکرد نمونه‌برداری با بدترین شرایط مواجهه در گروه‌های SEG، رویکرد

استانداردی است که توسط ارگان‌های اجرایی برای الزام کارفرمایان در انجام اقدامات کنترلی جهت کاهش مواجهه کارکنان تا زیر حد استاندارد تماس شغلی به‌کار می‌رود.

۹-۱-۱-۲) رویکرد پایش شغلی کارکنان در مشاغل غیر روتین

پایش شغلی کارکنانی که به کارهای روتین اشتغال ندارند، نمی‌تواند همانند مشاغل با وظایف روتین یا ثابت در نظر گرفته شود. از کارکنان دارای مشاغل غیر روتین می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

۱- کارکنان شاغل در وظایف خاص با دارای مدت زمان کوتاه کاری
۲- نیروهای کاری موقت
۳- وظایف مکرر در طول زمان
۴- تغییر محل انجام وظایف به‌صورت مکرر
۵- شیوه‌های کاری متغیر
۶- تماس‌های شغلی با تعداد زیادی از ترکیبات شیمیایی
۷- فقدان اطلاعات در مورد اثرات بالقوه ترکیبات شیمیایی در شرایط معمول مواجهه شغلی

به‌طور کلی، پایش مواجهه‌های "غیرعادی یا غیرمعمول" بسیار دشوار است. لازم به ذکر است که مشاغل دارای مواجهه‌های غیر روتین به وفور در صنایع مختلف دارویی، شیمیایی، نفت و پتروشیمی و اقسام صنایع دیگر مانند سیمان مشاهده می‌شوند. رویکرد پایش شغلی این کارکنان بسیار ارزشمند ولی متفاوت است و در مرحله نخست، توصیه می‌شود که این گروه از کارکنان شناسایی شوند و مسئولین کارگاه از آمادگی کامل برای پایش شغلی این کارکنان به‌شرح زیر برخوردار باشند:

۱- در صورت تشخیص وجود تماس‌های شغلی غیر روتین، متخصصین بهداشت حرفه‌ای می‌بایست مواجهه افراد را با استفاده از سیستم‌های کنترل مهندسی، اصلاح شیوه‌های کاری و وسایل حفاظت فردی کنترل نمایند.
۲- پایش شغلی سریع کارکنان وظایف غیر روتین با استفاده از روش‌های قرائت مستقیم توصیه می‌شود.
۳- می‌بایست بر اساس نتایج پایش شغلی، سیستم‌های کنترل مهندسی طراحی و به مرحله اجرا گذاشته شود.
۴- در مراتب بعدی از نتایج به‌دست آمده می‌توان برای تصمیم‌گیری در خصوص اقدامات کنترلی برای گروه‌های شغلی غیر روتین استفاده نمود.

۹-۱-۲) پایش فردی کارکنان گروه SEG طبق رویکرد آماری و مقایسه آن با OEL

به‌طور کلی سازمان British Occupational Hygiene Society (BOHS) مراتب ارزشیابی مواجهه کارکنان در گروه‌های SEG را با OEL در شش مرحله بیان می‌کند که به‌عبارت زیر مطرح می‌باشند:

۱-۲-۱-۹- اصول و مفاهیم مطابقت داده‌های مواجهه کارکنان با مفهوم OEL یا TLV
۲-۲-۱-۹- انتخاب گروه‌های SEG
۳-۲-۱-۹- آزمون غربالگری[1] مواجهه‌های شغلی کارکنان
۴-۲-۱-۹- بررسی توزیع آماری داده های مواجهه شغلی با استفاده از برنامه Python
۵-۲-۱-۹- ترسیم خط رگرسیون و برآورد صدک ۹۸
۶-۲-۱-۹- مطابقت صدک ۹۸ با OEL و تفسیر داده‌ها

۹-۱-۲-۱) اصول و مفاهیم مطابقت داده‌های مواجهه کارکنان با مفهوم OEL یا TLV

ارزشیابی داده‌های مواجهه شغلی کارکنان گروه SEG از طریق مقایسه مقادیر به‌دست‌آمده با مقدار OEL در قالب حدود استاندارد میانگین وزن‌دار زمانی برای مدت زمان ۸ ساعت (TWA)، مدت زمان کوتاه ۱۵ دقیقه (STEL) و یا مدت زمان سقفی (C) انجام می‌شود و در شرایط استثنایی، OELهای تعدیل‌شده برای شیفت‌های کاری غیرمتعارف در نظر گرفته خواهند شد. میزان مواجهه فردی کارکنان با ترکیبات شیمیایی از طریق نمونه‌برداری از منطقه تنفسی آن‌ها و سپس آنالیز داده‌ها انجام می‌شود (برای توضیحات بیشتر به فصل ۵ رجوع شود).

۹-۱-۲-۲) انتخاب گروه‌های SEG

بر اساس تعریف ارائه‌شده توسط Mauthausen و Damiano، کارکنان دارای مشابهت در مواد شیمیایی مصرفی، فرآیندهای کاری یا یکسان بودن روش انجام وظایف و همچنین مدت زمان انجام وظایف محوله، گروه SEG گفته

[1] Screening Test

می‌شود. بدیهی است که مواجهه کارکنان در یک گروه SEG مستلزم بررسی دقیق چهار پارامتر نوع مواد شیمیایی، نوع فرآیند، فرآوری مواد و روش‌های کار و همچنین مقطع زمانی امور محوله است. همانطور که در فصل ۲ توضیح داده شد، به‌طور قطع استفاده از عناوین شغلی برای دسته‌بندی افراد در قالب گروه‌های SEG کافی نمی‌باشد و می‌بایست به این سه فاکتور در تعیین گروه‌های SEG دقت نمود.

تشکیل گروه‌های SEG در اکثر موارد به‌صورت مشاهده‌ای انجام می‌شود. در برخی موارد، می‌توان از طریق بررسی داده‌های قبلی پایش فردی و بررسی توزیع نرمال یا نرمال لگاریتمی داده‌های به‌دست‌آمده از مواجهه کارکنان، برای دسته‌بندی کارکنان در گروه‌های SEG اقدام نمود.

۹-۱-۲-۳) آزمون غربالگری مواجهه‌های شغلی کارکنان

بر اساس توصیه AIHA به‌منظور بررسی مطابقت فردی داده‌های پایش فردی یک گروه SEG با OEL، بر اساس فرآیند شرح داده‌شده در جدول ۹-۵ و بعد از تشخیص گروه SEG (گام اول)، سه نفر از اعضای تشکیل‌دهنده گروه SEG به‌طور تصادفی برای نمونه‌برداری و آنالیز داده‌های مواجهه فردی انتخاب می‌شوند (گام دوم). میزان مواجهه‌های افراد انتخاب‌شده با استفاده از روش‌های استاندارد ارائه‌شده توسط یکی از سازمان‌های NIOSH یا OSHA، اندازه‌گیری می‌شود (روش‌های استاندارد نمونه‌برداری و آنالیز نمونه‌ها و نحوه انتخاب روش به‌طور مشروح در فصول ۵، ۶ و ۷ توضیح داده‌شده است). پس از آنالیز داده‌ها و مقایسه با استانداردهای حد مجاز شغلی، نتایج به‌دست‌آمده بر اساس یکی از حالات زیر مورد تفسیر قرار می‌گیرد (گام سوم):

الف) در صورتی‌که داده‌های پایش فردی هر سه نفر کمتر از OEL×۰.۱ باشد، می‌توان مواجهه گروه SEG را رضایت بخش تفسیر کرد. در چنین شرایطی، برنامه پایش فردی برای این گروه SEG خاتمه یافته تلقی می‌شود و نیازی به انجام بررسی بیشتر نیست. اگرچه بررسی‌های ادواری برای اطمینان از ثبات مواجهه‌های شغلی این گروه توصیه می‌شود (جدول ۵-۹).

ب) در صورتیکه یکی از سه داده‌های به دست آمده از پایش فردی، بیشتر از مقدار OEL باشد و دلیل روشنی برای نامعتبر بودن این داده‌ها در نمونه‌برداری و سپس آنالیز متصور نباشد، به‌طور آشکار می‌توان نتیجه گیری نمود که میزان مواجهه این گروه SEG چالش برانگیز است و ادامه برنامه بررسی پایش شغلی تا زمان نصب سیستم‌های کنترلی خاتمه می‌یابد و پس از راه‌اندازی سیستم‌ها، ارزشیابی مواجهه شغلی گروه SEG برای حصول اطمینان از میزان مواجهه تا حدود کمتر از OEL می‌بایست به‌شرح جدول ۵-۹ به‌طور مجدد از اول شروع شود.

ج) در صورتی‌که داده‌های پایش فردی گروه SEG بیشتر از ۰.۱×OEL و کمتر از ۱×OEL باشند، برای حصول اطمینان از میزان مواجهه گروه SEG در مقایسه با حدود استاندارد تماس شغلی می‌بایست تعداد بیشتری از افراد گروه SEG به‌طور تصادفی انتخاب شوند و ترجیحاً تعداد افراد مورد مطالعه به ۱۰ نفر افزایش یابد (گام چهارم) (جدول ۵-۹).

جدول ۵-۹) سلسله مراتب ارزشیابی مواجهه شغلی در یک گروه SEG

گام اول: تشخیص گروه SEG، بررسی روش‌های ارزیابی ریسک کیفی و توصیه برای ارزشیابی مواجهه شغلی کارکنان		
گام دوم: انتخاب ۳ نفر از اعضای گروه SEG به‌صورت تصادفی		
گام سوم: ارزشیابی مواجهه شغلی افراد منتخب در گام دوم از طریق نمونه برداری، آنالیز نمونه‌ها و مقایسه داده‌ها با OEL		
>۱ × OEL اتمام برنامه ارزشیابی مواجهه شغلی، شروع فوری اقدامات کنترلی و سپس شروع مجدد برنامه‌های ارزشیابی مواجهه کارکنان	۱ -۰.۱ OEL شروع ارزشیابی مواجهه شغلی گروه SEG با تعداد بیشتری از کارکنان	<×۰.۱ OEL اتمام برنامه ارزشیابی مواجهه شغلی گروه SEG و برنامه‌ریزی ارزیابی ریسک ادواری
	گام چهارم: انتخاب تعداد نفرات بیشتری از گروه SEG به‌صورت تصادفی (حداکثر ۱۰ نفر)	
	گام پنجم: بررسی مواجهه شغلی گروه SEG از طریق نمونه‌برداری و آنالیز نمونه‌ها همانند گام اول	
	گام ششم: برررسی توزیع داده‌های مواجهه شغلی گروه SEG از طریق نرم‌افزار Python	
	گام هفتم: در صورت برقراری توزیع داده‌ها به‌صورت نرمال یا نرمال لگاریتمی محاسبه صدک ۹۸ از طریق استفاده از نرم‌افزار SPSS	
	گام هشتم: پذیرش یا عدم پذیرش مواجهه شغلی گروه SEG از طریق مقایسه صدک ۹۸ گروه با مقدار OEL	

۹-۱-۲-۴) بررسی توزیع آماری داده‌های مواجهه شغلی با استفاده از برنامه Python

کارکرد برنامه Pyhone برای بررسی توزیع آماری مواجهه شغلی در این کتاب در قالب یک مثال توضیح داده خواهد شد.

مثال شماره-۱: کارگران صنعت سازنده ورقه‌های PVC

یک گروه از کارگران صنعت پلاستیک‌سازی در بخش تولید ورقه‌های PVC دارای مواجهه با گاز و بخارات منومر وینیل کلراید هستند. اثرات مزمن مواجهه با منومر وینیل کلراید شامل سرطان ریه و کبد می‌باشد و مقدار TLV-TWA برای این ترکیب معادل ppm ۱ است. در این مثال تعداد ۱۱ نفر از کارگران در یک گروه شغلی و با وظیفه یکسان و میزان مواجهه مشابه از یک گروه ۱۰۰ نفری به‌صورت تصادفی انتخاب شدند.

میزان مواجهه شغلی با ترکیب وینیل کلراید (ppm)	میزان مواجهه شغلی از مقادیرکم تا زیاد (ppm)	رتبه مواجهه کارکنان گروه SEG	محاسبه صدک رتبه‌ای گروه SEG با فرمول: $\text{صدک رتبه‌ای مواجهه} = \frac{\text{رتبه مواجهه} \times 100}{n+1}$ تعداد افراد=n
۰.۸۱	۰.۲۲	۱	۸.۳
۰.۷۳	۰.۲۵	۲	۱۶.۷
۰.۵۴	۰.۲۹	۳	۲۵
۰.۳۵	۰.۳۵	۴	۳۳.۳
۰.۶۵	۰.۴۱	۵	۴۱.۷
۰.۲۲	۰.۴۶	۶	۵۰
۰.۲۹	۰.۵۴	۷	۵۸.۳
۰.۲۵	۰.۶۵	۸	۶۶.۷
۰.۴۱	۰.۶۹	۹	۷۵
۰.۶۹	۰.۷۳	۱۰	۸۳.۳
۰.۴۶	۰.۸۱	۱۱	۹۱.۷

مراحل انجام کار:

۱) در ابتدا آخرین نسخه از دو نرم‌افزار SPSS و PYTHON از سایت‌های اینترنتی معتبر دانلود و مطابق با راهنمای نرم‌افزار نصب شود (برای این منظور دو سایت به آدرس زیر توصیه می‌شود).

- https://soft98.ir/software/engineering/3536-%D8%AF%D8%A7%D9%86%D9%84%D9%88%D8%AF%E2%80%8C%E2%80%8C-%D8%A7%D8%B3-%D9%BE%DB%8C-%D8%A7%D8%B3-%D8%A7%D8%B3-%D8%AF%D9%88.html
- https://www.python.org/downloads/

۲) پس از نصب برنامه PYTHON لازم است تا کتابخانه‌های numpy, pandas, scipy, matlplotlib نصب شوند. برای این کار لازم است از قسمت جستجوی ویندوز command prompt را باز شود و دستورات زیر یک به یک و به صورت جداگانه وارد آن گردد. پس از نوشتن دستور نصب هر کتابخانه، دکمه enter را زده و صبر شود تا دانلود تمام شود. در حین اینکار سیستم کامپیوتر می‌بایست به اینترنت متصل باشد. دستورات به شرح زیر است:

- ✓ Pip install numpy
- ✓ Pip install scipy
- ✓ Pip install pandas
- ✓ Pip install matplotlib

۳) پس از نصب برنامه پایتون و کتابخانه‌های مربوطه، کد مورد نیاز (که از قبل برنامه‌نویسی شده و دانلود شده است) را در صفحه IDLE اجرا کنید (F5). برای باز کردن صفحه IDLE لازم است این عبارت را در جستجوی ویندوز تایپ کنید و سپس از گزینه File آن را باز کنید (file → open).

mycodes 5.py - C:\Users\A.SH\Downloads\Telegram Desktop\mycodes 5.py (3.12.4)

File Edit Format Run Options Window Help

```
    while True:
        data_input = input(prompt)
        data_array = np.array(data_input.split(','), dtype=float)
        if len(data_array) >= 3:
            return data_array
        else:
            print("لطفا حداقل سه مقدار وارد کنید.")

def check_normal_distribution(data):
    stat, p = shapiro(data)
    result = "Normal" if p > 0.05 else "Not Normal"
    return {"Test": "Shapiro-Wilk", "Statistic": stat, "P-value": p, "Result": result}

def check_log_normal_distribution(data):
    if len(data) < 8:
        return {"Test": "Normaltest", "Statistic": None, "P-value": None, "Result": "Insufficient data"}
    log_data = np.log(data)
    stat, p = normaltest(log_data)
    result = "Log Normal" if p > 0.05 else "Not Log Normal"
    return {"Test": "Normaltest", "Statistic": stat, "P-value": p, "Result": result}

def analyze_data(data, label):
    results = []
    results.append(check_normal_distribution(data))
    results.append(check_log_normal_distribution(data))
    results_df = pd.DataFrame(results)
    print(f"\nنتایج آزمون برای {label}:\n")
    print(results_df)

# دریافت داده‌های SEG
seg_data = receive_data("لطفا داده های SEG را وارد کنید (جدا شده با کاما): ")

# دریافت داده‌های تکرار آزمایش برای یک فرد
#repeat_data = receive_data("لطفا داده های تکرار آزمایش برای یک فرد را وارد کنید (جدا شده با کاما): ")

# تحلیل و نمایش نتایج برای داده‌های SEG
analyze_data(seg_data, "داده‌های SEG")

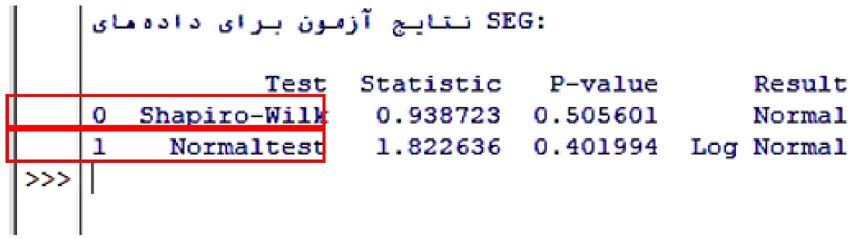
# تحلیل و نمایش نتایج برای داده‌های تکرار آزمایش برای یک فرد
#analyze_data(repeat_data, "داده‌های تکرار آزمایش برای یک فرد")
```

۴) سپس داده‌های میزان مواجهه برحسب ppm به‌صورت پشت سرهم و در محل مشخص شده وارد برنامه می‌شود. لازم به ذکر است که اعداد می‌بایست با ویرگول از هم جدا شوند.

```
Type "help", "copyright", "credits" or "license()" for more information.
>>
======== RESTART: C:\Users\A.SH\Downloads\Telegram Desktop\mycodes 5.py ========
لطفا داده های SEG را وارد کنید (جدا شده با کاما): 0.81,0.73,0.54,0.35,0.65,0.22,
0.29,0.25,0.41,0.69,0.46
```

۵) سپس دکمه enter زده می‌شود تا نتایج آزمون مشخص گردد.

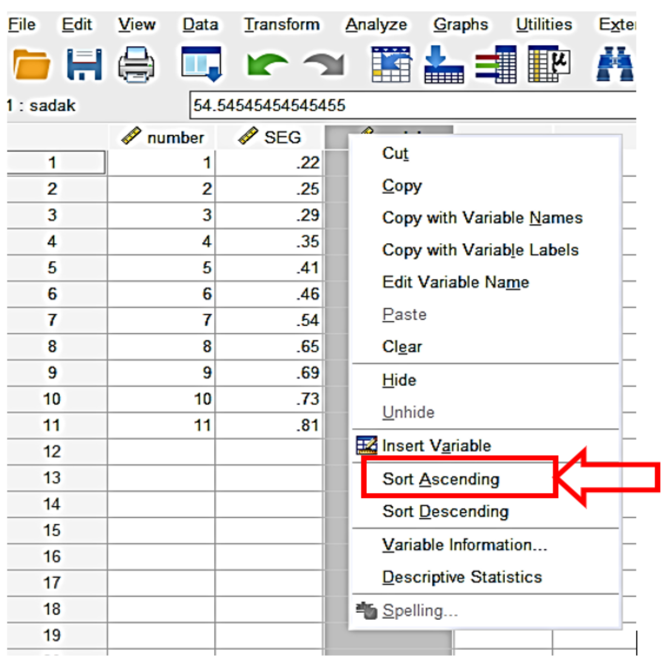
براساس نتایج آزمون انجام شده برای این مثال، مقدار p-value در هر دو آزمون بیشتر از ۰.۰۵ است. بنابراین می‌توان گفت داده‌ها دارای توزیع نرمال و یا نرمال لگاریتمی هستند.



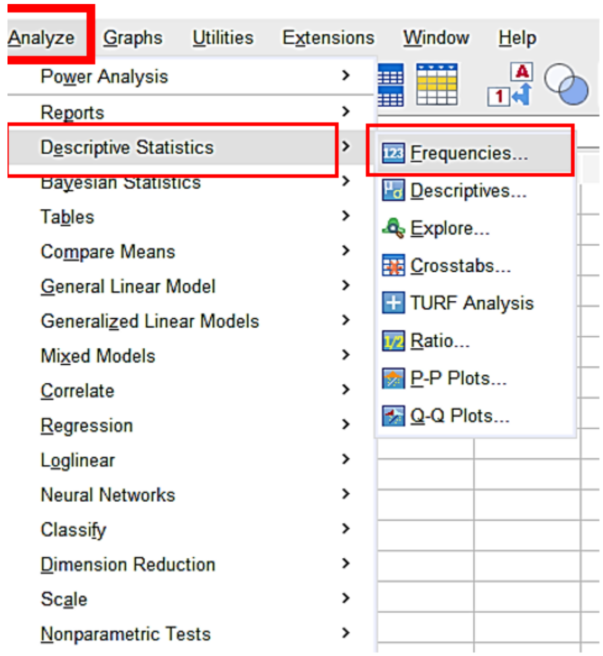
```
نتایج آزمون برای داده‌های SEG:

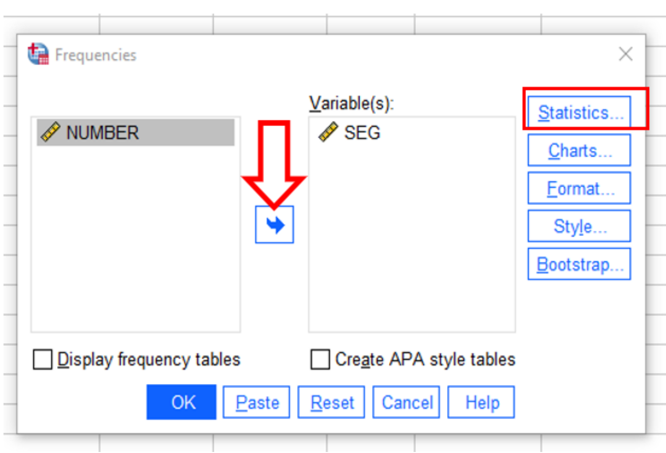
          Test   Statistic   P-value       Result
0  Shapiro-Wilk   0.938723  0.505601       Normal
1    Normaltest   1.822636  0.401994   Log Normal
>>>
```

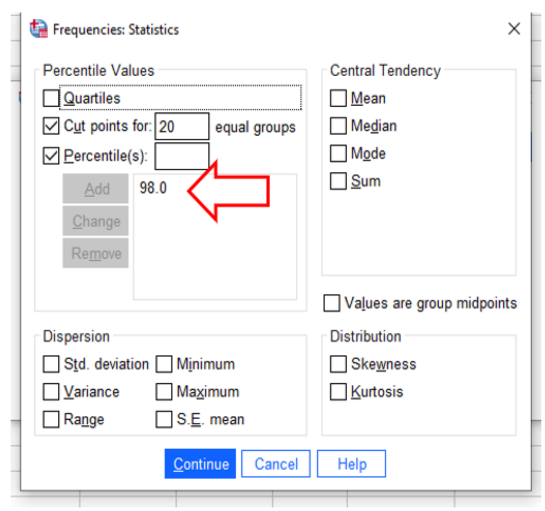
۶) در مرحله بعد، برای به دست آوردن صدک رتبه‌ای ۹۸ مواجهه شغلی، ابتدا داده‌های مواجهه از کمترین تا بیشترین مقدار وارد برنامه SPSS می‌شود (در این مثال اسم ستون داده‌ها، میزان مواجهه گروه SEG و شماره افراد به‌صورت number از کم به زیاد در نظر گرفته شده است). برای مرتب کردن داده‌ها، لازم است روی میزان مواجهه SEG کلیک راست کرده و گزینه Sort Ascending را انتخاب کنید.



۷) سپس مراحل می‌بایست به‌این ترتیب انجام شود: Frequencies → Descriptive Statistics → Analyze. کلمه SEG برای نشان دادن میزان مواجهه‌های شغلی گروه انتخاب شود. سپس در گزینه Statistics، همانند شکل زیر عدد ۹۸ وارد شود تا صدک رتبه‌ای ۹۸ محاسبه گردد. سپس continue → ok شود.







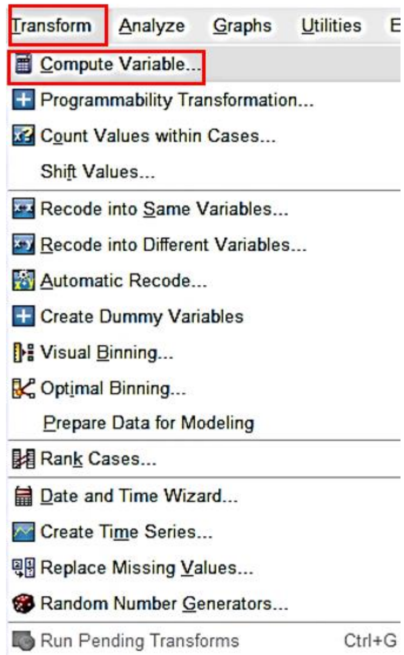
۸) همانطور که در جدول زیر مشخص است، در این سوال داده‌ای برای صدک رتبه‌ای ۹۸ وجود ندارد. به‌عبارت دیگر بزرگترین داده مواجهه شغلی معادل ۰.۷۹۴۰ ppm است که صدک رتبه‌ای ۹۵ را هم پوشش نمی‌دهد.

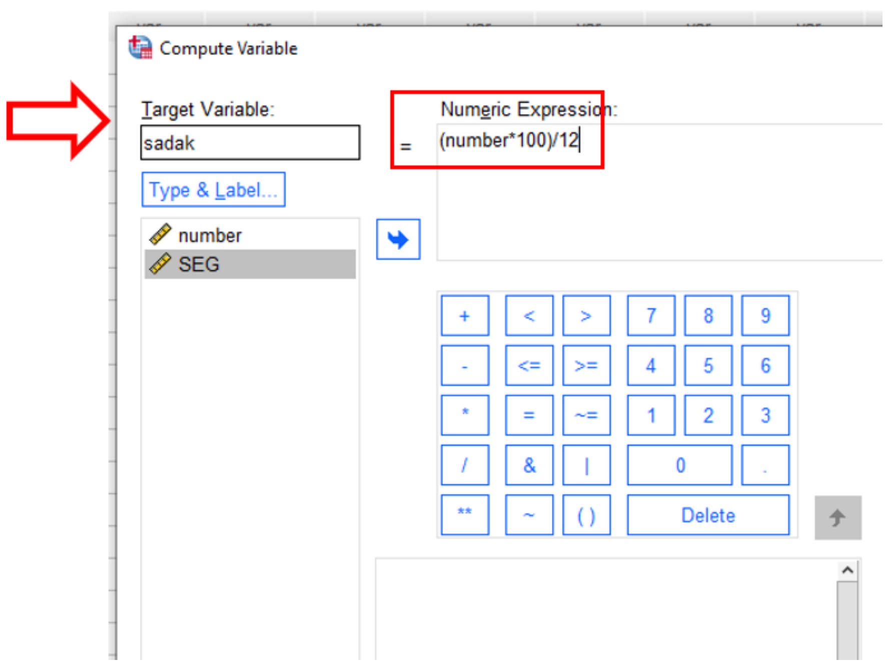
Statistics

SEG

N	Valid	11
	Missing	0
Percentiles	5	.2200
	10	.2260
	15	.2440
	20	.2660
	25	.2900
	30	.3260
	35	.3620
	40	.3980
	45	.4300
	50	.4600
	55	.5080
	60	.5620
	65	.6280
	70	.6660
	75	.6900
	80	.7140
	85	.7460
	90	.7940
	95	.
	98	.

۹) برای محاسبه تقریبی صدک رتبه‌ای ۹۸، صدک رتبه‌ای هر یک از اعضای گروه با توجّه به میزان مواجهه شغلی آنها محاسبه می‌شود. برای محاسبه صدک رتبه‌ای هر یک از اعضای گروه می‌بایست ابتدا ستونی به نام number برای اعضای گروه SEG از شماره ۱ تا ۱۱ تعریف و سپس مراحل Transfrom → compute variables به‌ترتیب اجرا شود. در پنجره Numeric Expression، فرمولی که در کادر قرمز رنگ نمایش داده شده است، وارد می‌شود و OK می‌گردد. اعداد نوشته شده در ستون sadak نشان دهنده صدک‌های رتبه‌ای تقریبی برای داده‌های گروه SEG می‌باشند.

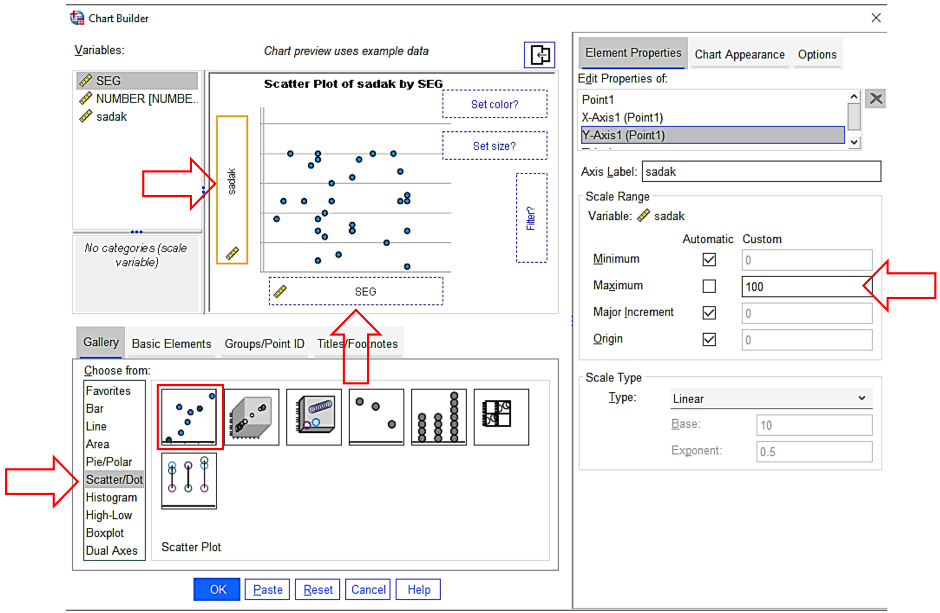

Transform
Analyze
Graphs
Utilities
Compute Variable...
Programmability Transformation...
Count Values within Cases...
Shift Values...
Recode into Same Variables...
Recode into Different Variables...
Automatic Recode...
Create Dummy Variables
Visual Binning...
Optimal Binning...
Prepare Data for Modeling
Rank Cases...
Date and Time Wizard...
Create Time Series...
Replace Missing Values...
Random Number Generators...
Run Pending Transforms
Ctrl+G


Compute Variable
Target Variable:
sadak
Numeric Expression:
=
(number*100)/12
Type & Label...
number
SEG
Delete

number	SEG	sadak
1	.22	8.33
2	.25	16.67
3	.29	25.00
4	.35	33.33
5	.41	41.67
6	.46	50.00
7	.54	58.33
8	.65	66.67
9	.69	75.00
10	.73	83.33
11	.81	91.67

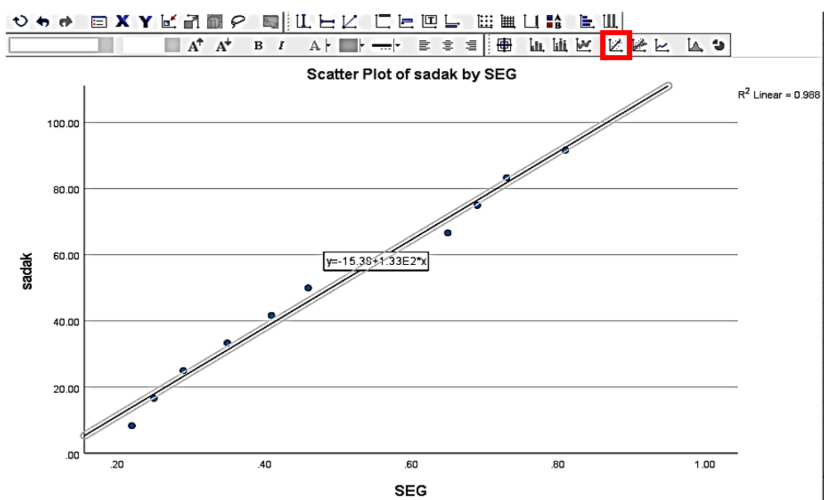
۹-۱-۲-۵) ترسیم خط رگرسیون و برآورد صدک ۹۸

۱۰) در مرحله بعد، رابطه بین میزان مواجهه‌های گروه SEG و صدک‌های رتبه‌ای آنها می‌بایست به وسیله نمودار نشان داده شود. برای این منظور لازم است مراحل Graphs →Chart builder اجرا شود و از زیر منوی باز شده، نمودار Scatter/Dot انتخاب گردد. صدک رتبه‌ای (Rank Percentile) به‌عنوان محور Y و میزان مواجهه افراد گروه (SEG) به‌عنوان محور X انتخاب شود. برای ترسیم محور X، حداکثر عدد ۱ و برای محور Y، حداکثر عدد ۱۰۰ را در نظر گرفته شود و سپس OK شود.



پس اجرای مراحل بالا، نمودار یا رابطه میزان مواجهه گروه SEG و صدک رتبه‌ای آنها در قالب شکل زیر ارائه خواهد شد. در این حالت از فرمول خط رگرسیون نمایش داده شده بر روی شکل $(Y= -15.38+1.33\times10^{2}X)$ می‌توان برای محاسبه صدک رتبه‌ای ۹۸ میزان مواجهه گروه SEG استفاده نمود.

98= 15.38 +113X
X=1.0 ppm



۹-۱-۲-۶)   مطابقت صدک ۹۸ با OEL و تفسیر داده‌ها

۱۱) صدک ۹۸ میزان مواجهه با توجّه به فرمول خط رگرسیون معادل ppm ۰.۸۸ به‌دست می‌آید که مقداری کمتر از TLV ارائه شده برای ترکیب وینیل کلراید (TLV-TWA =۱ ppm) است. از این‌رو می‌توان گفت که مواجهه کارکنان گروه SEG کنترل شده است. در این حالت ارزیابی ریسک ادواری و در صورت لزوم ارزشیابی مواجهه شغلی کارکنان در آینده مورد نیاز می‌باشد.

مثال شماره-۲: کارکنان آبکاری کروم

گروهی از کارکنان SEG مستقر در کنار وان‌های آبکاری که در مواجهه با میست کروم شش ظرفیتی هستند. بر اساس اطلاعات مندرج در آخرین جلد منتشر شده کتابچه TLV سازمان ACGIH در سال ۲۰۲۴، مواجهه شغلی با مقادیر بیشتر از TLV-TWA= ۰.۰۰۰۲ mg/m^3 از میست کروم شش ظرفیتی محلول در درازمدت منجر به بروز اثرات مزمنی همچون سرطان ریه و سرطان مجاری بینی و اثرات کوتاه مدتی مانند تحریک‌کنندگی مجاری سیستم تنفسی و آسم شغلی خواهد شد. در این مثال، کارگران مورد پایش به تعداد ۱۰ نفر از یک گروه شغلی با وظیفه یکسان و دارای مواجهه مشابه بودند که از یک گروه ۹۰ نفری به‌صورت تصادفی انتخاب شدند. میزان مواجهه افراد نمونه با کروم شش ظرفیتی بر اساس روش NIOSH-۷۶۰۰ تعیین مقدار شد. محاسبه صدک رتبه‌ای[1] بر اساس داده‌های مواجهه شغلی در جدول زیر نمایش داده شده است. با توجّه به داده‌های به‌دست آمده از پایش گروه SEG آبکاری، میزان مواجهه آنها با کروم شش ظرفیتی در دامنه ۰.۱ تا ۱ برابر OEL به‌دست آمده است. به منظور بررسی توزیع آماری این گروه می‌بایست مراحل زیر به‌ترتیب انجام شود.

میزان مواجهه شغلی با ترکیب کروم شش ظرفیتی ($\mu g/m^3$)	میزان مواجهه شغلی از مقادیرکم تا زیاد ($\mu g/m^3$)	رتبه مواجهه کارکنان گروه SEG	محاسبه صدک رتبه‌ای گروه SEG با فرمول: $\text{صدک رتبه‌ای مواجهه} = \frac{\text{رتبه مواجهه} \times ۱۰۰}{n+1}$ n=تعداد افراد
۰.۰۴	۰.۰۱	۱	۹.۱
۰.۰۱	۰.۰۳	۲	۱۸.۱
۰.۱۵	۰.۰۴	۳	۲۷.۳
۰.۰۳	۰.۰۸	۴	۳۶.۴
۰.۰۸	۰.۰۹	۵	۴۱.۷
۰.۱۸	۰.۱۲	۶	۵۴.۵
۰.۱۶	۰.۱۵	۷	۶۳.۷
۰.۱۲	۰.۱۶	۸	۷۲.۷
۰.۱۹	۰.۱۸	۹	۸۱.۸
۰.۰۹	۰.۱۹	۱۰	۹۰.۹

[1] Rank Percentile

مراحل انجام کار:

۱) پس از نصب برنامه پایتون و کتابخانه‌های مربوطه، کد مورد نیاز را در صفحه IDLE اجرا کنید (F5).

```
mycodes 5.py - C:\Users\A.SH\Downloads\Telegram Desktop\mycodes 5.py (3.12.4)
File  Edit  Format  Run  Options  Window  Help
    while True:
        data_input = input(prompt)
        data_array = np.array(data_input.split(','), dtype=float)
        if len(data_array) >= 3:
            return data_array
        else:
            print("لطفا حداقل سه مقدار وارد کنید.")

def check_normal_distribution(data):
    stat, p = shapiro(data)
    result = "Normal" if p > 0.05 else "Not Normal"
    return {"Test": "Shapiro-Wilk", "Statistic": stat, "P-value": p, "Result": result}

def check_log_normal_distribution(data):
    if len(data) < 8:
        return {"Test": "Normaltest", "Statistic": None, "P-value": None, "Result": "Insufficient data"}
    log_data = np.log(data)
    stat, p = normaltest(log_data)
    result = "Log Normal" if p > 0.05 else "Not Log Normal"
    return {"Test": "Normaltest", "Statistic": stat, "P-value": p, "Result": result}

def analyze_data(data, label):
    results = []
    results.append(check_normal_distribution(data))
    results.append(check_log_normal_distribution(data))
    results_df = pd.DataFrame(results)
    print(f"\nنتایج آزمون برای {label}:\n")
    print(results_df)

# دریافت داده‌های SEG
seg_data = receive_data("لطفا داده های SEG (جدا شده با کاما) را وارد کنید: ")

# دریافت داده‌های تکرار آزمایش برای یک فرد
#repeat_data = receive_data("لطفا داده های تکرار آزمایش برای یک فرد را وارد کنید (جدا شده با کاما): ")

# تحلیل و نمایش نتایج برای داده‌های SEG
analyze_data(seg_data, "داده‌های SEG")

# تحلیل و نمایش نتایج برای داده‌های تکرار آزمایش برای یک فرد
#analyze_data(repeat_data, "داده‌های تکرار آزمایش برای یک فرد")
```

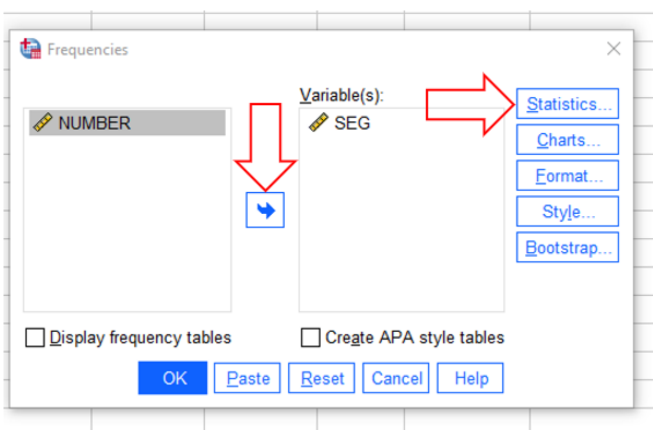
۲) سپس داده‌های میزان مواجهه برحسب ppm به صورت پشت سرهم در برنامه وارد و دکمه Enter زده می‌شود تا نتایج آزمون مشخص گردد.

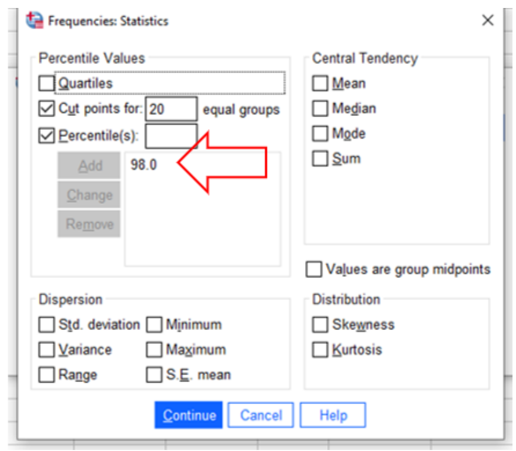
```
*IDLE Shell 3.12.4*
File  Edit  Shell  Debug  Options  Window  Help
Python 3.12.4 (tags/v3.12.4:8e8a4ba, Jun  6 2024, 19:30:16) [MSC v.1940 64 bit (AMD64)] on win32
Type "help", "copyright", "credits" or "license()" for more information.
>>>
= RESTART: C:\Users\A.SH\Downloads\Telegram Desktop\mycodes 5.py
لطفا داده های SEG (جدا شده با کاما) را وارد کنید: 0.04,0.01,0.15,0.03,0.08,0.18,0.16,0.12,0.19,0.09
...
```

براساس نتایج آزمون انجام شده، مقدار p-value بیشتر از ۰.۰۵ به‌دست آمده است و از این‌رو می‌توان گفت که داده‌ها از توزیع نرمال و یا نرمال لگاریتمی برخوردار هستند.

۳) در مرحله بعد برای به دست آوردن صدک رتبه‌ای ۹۵ یا ۹۸ مواجهه شغلی، ابتدا داده‌های مواجهه از کمترین تا بیشترین مقدار وارد برنامه SPSS می‌شود (در این مثال اسم ستون داده‌ها، SEG و شماره افراد به‌صورت number از کم به زیاد در نظر گرفته شده است).

۴) سپس مراحل می‌بایست به‌این ترتیب انجام شود: Frequencies → Descriptive Statistics → Analyze. کلمه SEG انتخاب شود. سپس در گزینه Statistics. همانند شکل زیر عدد ۹۵ و ۹۸ وارد شود. سپس ok → continue شود.





۵) همانطور که در جدول زیر مشخص است، در این مثال، داده‌های صدک ۹۵ و ۹۸ وجود ندارد. به‌عبارت دیگر بزرگترین داده میزان مواجهه ($0.1890\ \mu g/m^3$) در قبل از صدک ۹۵ قرار می گیرد.

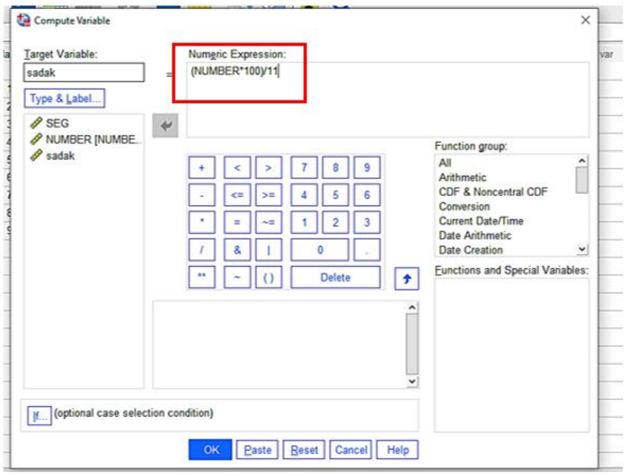
Frequencies

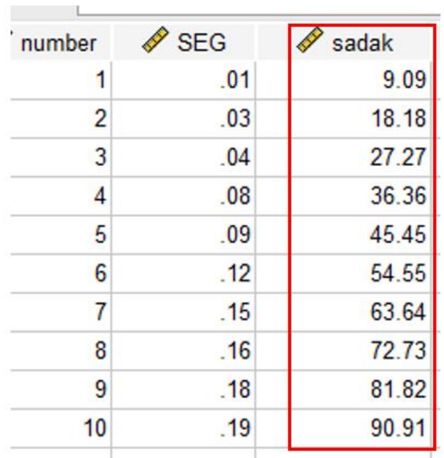
Statistics

SEG

N	Valid	10
	Missing	0
Percentiles	10	.0120
	20	.0320
	30	.0520
	40	.0840
	50	.1050
	60	.1380
	70	.1570
	80	.1760
	90	.1890
	95	.
	98	.

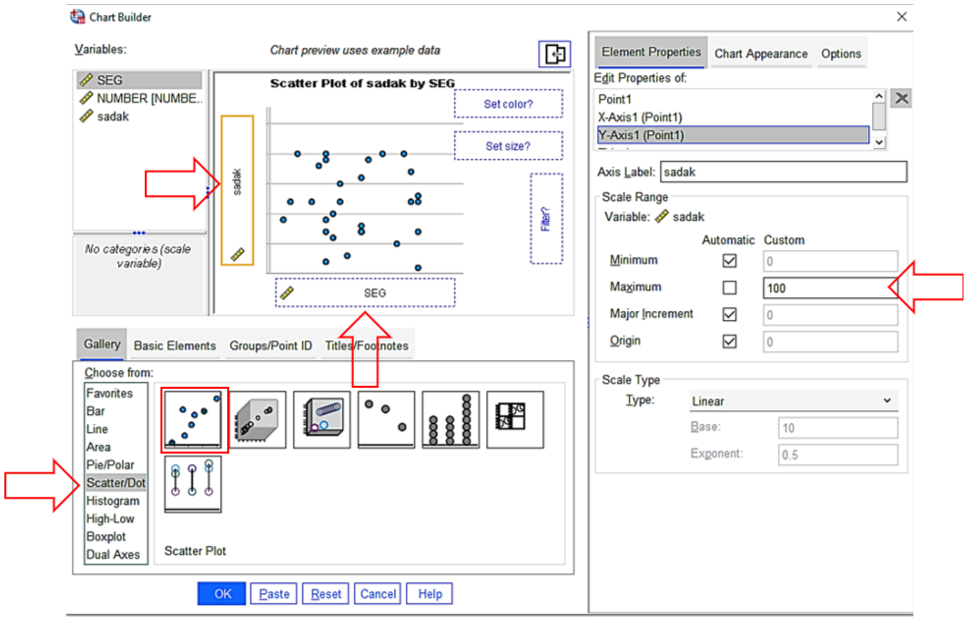
۶) برای محاسبه صدک رتبه‌ای هر یک از اعضای گروه، ستونی به نام number برای اعضای گروه SEG از شماره ۱ تا ۱۰ تعریف و سپس مراحل Transfrom → compute variables به‌ترتیب اجرا می‌شود. در پنجره Numeric Expression، فرمولی که در کادر قرمز رنگ نمایش داده شده است، وارد می‌شود و OK می‌گردد. اعداد نوشته شده در ستون sadak نشان دهنده صدک‌های رتبه‌ای تقریبی برای داده‌های گروه SEG می‌باشند.

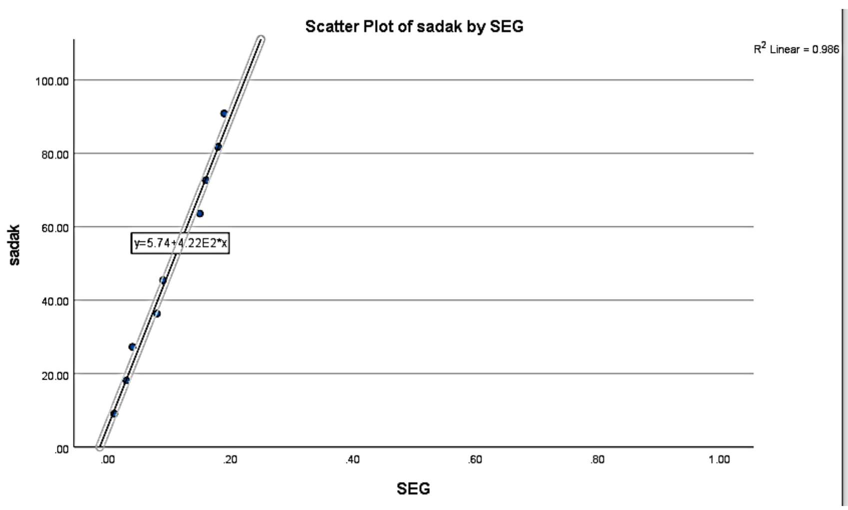




number	SEG	sadak
1	.01	9.09
2	.03	18.18
3	.04	27.27
4	.08	36.36
5	.09	45.45
6	.12	54.55
7	.15	63.64
8	.16	72.73
9	.18	81.82
10	.19	90.91

۷) برای نشان دادن رابطه بین میزان مواجهه‌های گروه SEG و صدک‌های رتبه‌ای آنها می‌بایست مراحل Graphs →Chart builder اجرا شود و از زیر منوی باز شده، نمودار Scatter/Dot انتخاب گردد. صدک رتبه‌ای (sadak) به‌عنوان محور Y و میزان مواجهه افراد گروه (SEG) به‌عنوان محور X انتخاب شود. برای ترسیم محور X، حداکثر عدد ۱ و برای محور Y، حداکثر عدد ۱۰۰ را در نظر گرفته شود و سپس OK شود تا نمودار ترسیم گردد.





با استفاده از فرمول خط رگرسیون نمایش داده شده بر روی شکل ($Y=5.74+4.22\times10^2X$)، صدک رتبه‌ای ۹۸ میزان مواجهه برای گروه SEG محاسبه می‌شود. صدک ۹۸ میزان مواجهه با توجّه به فرمول خط رگرسیون معادل ۰.۲۲ $\mu g/m^3$ به‌دست می‌آید که مقدار بیشتری از حدود TLV یا OEL (۰.۰۰۰۲ mg/m^3) می‌باشد. از این‌رو می‌توان نتیجه‌گیری کرد که مواجهه کارکنان در گروه SEG آبکاری کروم شش ظرفیتی، کنترل نشده است

و انجام اقدامات کنترلی در قالب اجرای اقدامات فنی مهندسی، مدیریتی و استفاده از وسایل حفاظت فردی برای کارکنان الزامی است.

منابع و مراجع اطلاعاتی

Azari MR, Tayefeh-Rahimian R, Jafari MJ, Souri H, Shokoohi Y, Tavakol A, Yazdanbakhsh Z. Exploring a new method for the biological monitoring of plastic workers exposed to the vinyl chloride monomer. Toxicology and Industrial Health. 2016 Dec;32(12):1921-6.

Bullock WH, Ignacio J, Ignacio JS. A strategy for assessing and managing occupational exposures. AIHA; 2006. 3rd Edition. USA. ISBN 1-931504-69-4.

Calculating The Sample Size for a Confidence Interval. Available from: https://ecampusontario.pressbooks.pub/introstats/chapter/7-5-calculating-the-sample-size-for-a-confidence-interval/

Introduction to Python. Available from: https://www.w3schools.com/python/python_intro.asp

McDermott HJ. Air monitoring for toxic exposures. John Wiley & Sons; 2004 Oct 12. 2rd Edition. ISBN 0-471-45435-4.

Mozafari P, Azari MR, Shokoohi Y, Sayadi M. Feasibility of biological effective monitoring of chrome electroplaters to chromium through analysis of serum malondialdehyde. The International Journal of Occupational and Environmental Medicine. 2016 Oct;7(4):199.

Normal distribution with python. Available from: https://medium.com/@snehabajaj108/the-normal-distribution-with-python-2cb3bf57ee47

Percentiles, Percentile Rank & Percentile Range: Definition & Examples. Available from: https://www.statisticshowto.com/probability-and-statistics/percentiles-rank-range/

Testing Compliance with Occupational Exposure Limits for Airborne Substances. British Hygiene Society Originally published September 2011.

TLVs® and BEIs® Based on the Documentation of the Threshold Limit Values for Chemical Substances and Physical Agents Biological Exposure ACGIH 2024.

فصل ۱۰: تفسیر داده‌های ارزشیابی مواجهه شغلی کارکنان گروه‌های SEG با ترکیبات هوابرد در قیاس با استانداردهای حد تماس شغلی

۱۰–۱) مقدمه

مهندسی بهداشت حرفه‌ای به‌عنوان تلفیقی از علم و هنر و تعهد در جهت ارتقای سلامت کارکنان و جوامع مطرح می‌باشد. ارکان رشته مهندسی بهداشت حرفه‌ای بر اساس تعریف سازمان AIHA شامل پیش‌بینی[۱]، شناسایی[۲]، ارزشیابی مواجهه[۳] و کنترل[۴] عوامل مخاطره‌آمیز محیط کار تعریف شده است. جزئیات جنبه علمی این رشته در مراجع متعدد یافت می‌شود ولی جنبه هنری این رشته به خلاقیت کارشناسان در کاربرد متعالی این علم برای ارتقای سلامت کارکنان و استاندارد زندگی جامعه هدف اشاره دارد.

چالش‌های متخصصان رشته بهداشت حرفه‌ای در سال‌های اخیر با توجّه به اطلاعات گسترده‌ای که به اشکال مختلف در مراجع علمی و اینترنت یافت می‌شود، بسیار کمتر از گذشته است. لازم به‌ذکر است که ارزیابی و ارزشیابی مواجهه شغلی کارکنان علی‌رغم پیشرفت‌های علمی، همچنان بسیار پیچیده و پرهزینه است. از این‌رو در این فصل تلاش شده است تا فرایند انجام ارزیابی و ارزشیابی کارکنان به نحوه مقتضی توضیح داده شود.

۱۰–۱–۱) مراحل انجام ارزیابی و ارزشیابی کارکنان

۱- برآورد کارشناسان خبره مهندسی بهداشت حرفه‌ای در مورد میزان مواجهه شغلی کارکنان در گروه‌های SEG با استفاده از روش ارزیابی ریسک (به فصل ۴ مراجعه شود) و اطلاعات کامل از فرایندهای صنعتی مطرح می‌باشد. این تخمین می‌بایست متجانس با میزان مواجهه شغلی کارکنان در مقالات علمی برای فرایندهای مشابه صنعتی باشد. ضمناً تعدادی از اندازه‌گیری‌های قرائت مستقیم در برخی از موارد برای تأیید برآورد نظریه کارشناس نیز می‌تواند مفید واقع شود.

[1] Anticipation
[2] Recognition
[3] Evaluation
[4] Control

۲- داده‌های جایگزین نیز مشروط به شرایط یکسان مواجهه شغلی کارکنان و همچنین شرایط فیزیکی محیط کار می‌توانند در زمانی که داده‌های حقیقی گروه‌های SEG در محیط کار در دسترس نباشند، مورد استفاده قرار گیرند. در چنین شرایطی داده‌های یاد شده با قضاوت حرفه‌ای کارشناسان خبره تعدیل می‌گردند و این داده‌ها می‌توانند برای غربالگری گروه‌های SEG به‌منظور ارزشیابی از طریق نمونه‌برداری و آنالیز استفاده شوند.

۳- کارشناسان خبره مهندسی بهداشت حرفه‌ای می‌توانند میزان مواجهه شغلی کارکنان در گروه SEG هدف را از طریق کاربرد مدل‌های شبیه‌ساز و پیش‌فرض‌های میزان ورود آلاینده‌ها از منابع مختلف و پارامترهای هواشناسی محاسبه نمایند. در برخی از محیط‌های کاری، تخمین ارزشیابی مواجهه شغلی می‌تواند با استفاده از مدل‌های معتبر و بدون کاربرد روش‌های پرهزینه و پیچیده نمونه‌برداری و آنالیز برآورد شود. در این شرایط اقدامات کنترلی می‌تواند سریعاً شروع گردد و یا حداقل این برآورد از میزان مواجهه شغلی کارکنان می‌تواند برای غربالگری ارزشیابی مواجهه شغلی استفاده شود و هزینه چنین اقداماتی را به حداقل برساند. برای مثال در یک مطالعه صورت گرفته توسط متخصصین بهداشت حرفه‌ای داخل کشور، یک مدل دینامیکی محاسبات سیالات (CFD)[1] برای برآورد غلظت بنزن در نقاط مختلف یک پالایشگاه نفت استفاده گردید. مدل CFD یاد شده می‌تواند با در نظر گرفتن شرایط هواشناسی و با پیش فرض میزان رهایش بنزن، غلظت ترکیب یاد شده را با درستی قابل توجّهی اندازه‌گیری نماید (Bayatian et al., 2021).

۴- بنا به تشخیص متخصصان رشته مهندسی بهداشت حرفه‌ای، بهترین روش برای ارزشیابی وضعیت تماس شغلی کارکنان، استفاده از روش‌های مصوب از یکی از سازمان‌های مرجع مهندسی بهداشت حرفه‌ای است. لازم به یادآوری است که ارزشیابی مواجهه شغلی کارکنان بسیار پیچیده، وقت‌گیر و پرهزینه می‌باشد. از

[1] Computational fluid dynamics

این‌رو بررسی‌های نخستین جهت انجام مراتب ارزشیابی مواجهه شغلی کارکنان به‌شرح دیاگرام زیر برای دستیابی به داده‌های صحیح تأکید می‌گردد.

۵- (در اینجا باید دیاگرام مدنظر ارائه شود، اما چون این‌طور که به نظر می‌رسد دیاگرام در متنی که فرستاده‌اید وجود ندارد، شما می‌توانید آن را به صورت جداگانه وارد کنید یا توضیح بیشتری در خصوص آن ارائه دهید).



شکل ۱-۱۰) دیاگرام مراتب ارزشیابی مواجهه شغلی کارکنان در گروه‌های SEG

٦- رویکرد آماری به‌عنوان یک روش مناسب برای ارزشیابی مواجهه شغلی گروه‌های SEG توصیه شده است. با توجّه به مراتب، انتخاب رویکرد آماری برای تعیین وضعیت مواجهه شغلی کارکنان گروه SEG، تعداد ۶

تا ۱۰ نفر در هر گروه به‌صورت تصادفی انتخاب می‌شوند و نمونه‌برداری از آنها به‌منظور برآورد میزان مواجهه با ترکیبات شیمیایی اولویت‌دار انجام می‌شود. برای ارزشیابی صحیح مواجهه شغلی کارکنان، میزان خطاهای نمونه‌برداری و آنالیز می‌بایست بر اساس بخش ضمیمه فصل ۱۰ محاسبه و لحاظ شود (ضمیمه شماره-۱).

۷- با توجّه به داده‌های مواجهه شغلی کارکنان در گروه SEG و وضعیت توزیع داده‌های به‌صورت log normal، میانگین میزان مواجهه می‌بایست بررسی گردد.

۸- به‌منظور مقایسه میزان مواجهه شاغلین با استانداردهای حد تماس شغلی PEL و یا TLV، داده‌های مواجهه می‌بایست با توجّه به شرایط فیزیکی (دما و فشار اتمسفریک) محل کار و با استفاده از فرمول‌های زیر اصلاح گردد:

$$C_{NTP} = \frac{C}{\frac{760}{P} \times \frac{T}{298}}$$

که در آن:

C_{NTP} = تراکم ترکیب در شرایط دما و فشار نرمال برحسب ppm
C = تراکم ترکیب در محل نمونه‌برداری بر حسب ppm
P = فشار هوا در محل نمونه‌برداری بر حسب میلی‌متر جیوه
T = دمای هوا در محل نمونه‌برداری بر حسب کلوین (^{o}K ۲۵+۲۷۳)
NTP = دمای معادل ۲۵ درجه سانتی‌گراد و فشار هوای محیط معادل ۷۶۰ میلی‌متر جیوه

۹- تعدیل PEL و یا TLV بر اساس شیفت کاری غیر استاندارد (بیشتر ۸ ساعت کار در روز و ۵ روز در هفته) با استفاده از فرمول Brief and Scala ارائه شده در کتابچه TLV سازمان ACGIH به‌شرح زیر انجام گردد:

$$\text{PEL or TLV} = \frac{8 \times (24 - h) \times \text{TLV}-\text{TWA}}{16 \times h}$$

h = ساعات کار در روز

برای مثال برای ترکیب تولوئن مقدار TLV-TWA برای شرایط متعارف کاری ۸ ساعت در روز و ۵ روز در هفته معادل ۲۰ppm است که در شیفت‌های کاری غیر متعارف (۱۲ ساعت در روز و ۵ روز در هفته) بر اساس فرمول ارائه شده برابر خواهد بود با:

در شرایط شیفت کاری غیرمتعارف $TLV = \frac{8 \times (24 - 12) \times 20\ ppm}{16 \times 12} = 10\ ppm$

تصحیح مقادیر TLV-TWA بر اساس تعداد کل ساعات کاری در هفته نیز بر اساس فرمول زیر انجام می‌شود:

در شرایط شیفت کاری غیرمتعارف $TLV = \frac{40/h \times (168 - h)}{128} \times TLV - TWA$

h = ساعات کاری هفته

برای مثال اگر کارگران یک صنعت تعداد ۷ شیفت ۸ ساعته عادی را در یک هفته کار نمایند و در مواجهه با حلال استون باشند، مقدار تعدیل شده TLV برای ارزشیابی مواجهه کارگران معادل خواهد بود با:

مقدار TLV برای استون در شرایط متعارف =۱۰۰۰ ppm

مقدارTLVدر شرایط غیرمتعارف کاری $= \frac{40/56 \times (168 - 56)}{128} \times 1000 = 625\ ppm$

۱۰-با توجّه به تعدیل TLV-TWA در شیفت‌های غیرمتعارف هنوز می‌بایست برای ارزشیابی مواجهه‌های شغلی، دو پارامتر دیگر با توجّه به خطاهای نمونه‌برداری و آنالیز به‌صورت ضریب اطمینان دست بالا (۹۵٪ UCL)[1] و ضریب اطمینان دست پایین (۹۵٪ LCL)[2] را در نظر گرفت. دو پارامتر LCL و UCL به مفهوم

[1] Upper Confidence Limit

[2] Lower Confidence Limit

محاسبه خطاها از داده‌های مواجهه شغلی در هر گروه SEG بر اساس دستور سازمان بهداشت و ایمنی کشور کانادا (IRSST)[1] می‌باشد که مراتب آن به‌شرح زیر می‌باشد:

$LCL_{95\%} = X - 1.96 \times CV_T$

$UCL_{95\%} = X + 1.96 \times CV_T$

که در آن:

CV = ضریب تغییرات اندازه‌گیری‌ها
X = میانگین اندازه‌گیری‌ها

برای محاسبه CV می‌توان از فرمول زیر استفاده نمود:

$$\text{ضریب تغییرات} = \frac{\text{انحراف معیار}\ (SD)}{\text{میانگین}\ (\bar{x})}$$

$$CV_T = \sqrt{(CV_S)^2 + (CV_A)^2}$$

CV_T به مفهوم ضریب تغییرات کل[2] از ریشه دوم مربعات ضریب تغییرات نمونه‌برداری CV_S و ضریب تغییرات آنالیز CV_A تشکیل شده است. از آنجایی‌که ضریب تغییرات نمونه‌برداری (CV_S) قابل اندازه‌گیری نمی‌باشد و مقدار آن معمولاً معادل ۰.۰۵ ضریب تغییرات کل (CV_T) تخمین زده می‌شود، در فرمول فوق فقط به جایگذاری متغیر ضریب تغییرات آنالیز (CV_A) بسنده می‌شود. پذیرش مواجهه شغلی کارکنان گروه SEG بر اساس مقایسه با TLV یا OEL و خطای نمونه‌برداری و آنالیز به‌شرح زیر انجام می‌شود:

۱- در صورتی که $UCL_{95\%} < OEL$ باشد، مواجهه در حد استاندارد و قابل قبول است.
۲- در صورتی که $UCL_{95\%} > OEL$ و $LCL_{95\%} < OEL$ باشد، پذیرش مواجهه در قیاس با حد استاندارد تماس شغلی نامشخص است.
۳- در شرایطی که $LCL_{95\%} > OEL$ باشد، مواجهه بیشتر از حد استاندارد تماس شغلی و غیر قابل قبول است.

[1] Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail
[2] Total Coefficient of Variation

لازم به‌ذکر است که پارامترهای UCL و LCL از طرف سازمان OSHA نیز با در نظر گرفتن پارامتر خطای نمونه‌برداری و آنالیز محاسبه می‌شوند. بدین ترتیب که این میزان خطا از طرف سازمان OSHA برای هر روش نمونه‌برداری و آنالیز ترکیبات شیمیایی، بر حسب PEL و یا TLV محاسبه می‌شود و از طریق آزمایشگاه مرکزی سازمان ارائه می‌گردند. با توجّه به خطاهای نمونه‌برداری و آنالیز، مقادیر $LCL_{95\%}$ و $UCL_{95\%}$ به‌شرح فرمول‌های زیر محاسبه می‌شود:

$$UCL_{95\%} = Y + SAE$$

$$LCL_{95\%} = Y - SAE$$

در اینجا Y یک نسبت به‌دست آمده از تقسیم میانگین مواجهه شغلی فرد (X) به استاندارد تماس شغلی PEL و یا TLV است.

$$Y = X/PEL$$

SAE در فرمول فوق به مفهوم خطاهای نمونه‌برداری و آنالیز بر حسب PEL ترکیب مورد نظر است. خطای آنالیز بر اساس تست‌های آزمایشگاه سازمان OSHA به‌طور مستقل برای ترکیبات مختلف اندازه‌گیری می‌شوند و پذیرش مواجهه شغلی بر اساس استانداردهای تماس شغلی (PEL و یا TLV) از مقایسه مقادیر $UCL_{95\%}$ و $LCL_{95\%}$ در مقایسه با عدد ۱ به‌شرح زیر انجام می‌شود:

۱- در صورتی که ۱ > $UCL_{95\%}$ باشد، مواجهه در حد استاندارد و قابل قبول است.

۲- در صورتی که ۱ > $LCL_{95\%}$ و ۱ < $UCL_{95\%}$ باشد، احتمالاً مواجهه بیشتر از حد استاندارد تماس شغلی است.

۳- در شرایطی که ۱ < $LCL_{95\%}$ باشد، مواجهه بیشتر از حد استاندارد تماس شغلی است.

علی‌رغم جامعیت روش ارائه شده از سوی سازمان OSHA برای محاسبات $LCL_{95\%}$ و $UCL_{95\%}$، این روش به لحاظ محدودیت دسترسی به ضرایب خطای نمونه‌برداری و آنالیز در ایران، با چالش‌هایی روبرو است. لازم به‌ذکر

است که خطای نمونه‌برداری و آنالیز را می‌توان از محاسبه ضریب تغییرات و سپس انحراف معیار اندازه‌گیری تراکم در حد استاندارد تماس شغلی (TLV یا OEL) در آزمایشگاه به‌دست آورد و سپس مقادیر $LCL_{95\%}$ و $UCL_{95\%}$ را از طریق فرمول آماری مربوطه محاسبه نمود (بخش ضمیمه شماره-۱). با شرط پذیرش محاسبه خطاهای نمونه‌برداری و آنالیز، می‌توان روش ارائه شده سازمان OSHA را با توجّه به جامعیت آن در مورد پذیرش مواجهه شغلی چندگانه و همزمان، ملاک قضاوت در ارزشیابی‌ها قرار داد و بر روش قبلی ارائه شده از سوی سازمان IRSST کانادا ارجح‌تر دانست.

خطای نمونه‌برداری و آنالیز[1] به‌شرح فرمول زیر محاسبه می‌گردد:

میزان خطا $= Z\times \sigma/\sqrt{(n)}$

متغیر Z در فرمول بالا معادل ضریب اطمینان است که بر اساس جدول ۱-۱۰ می‌توان نسبت به انتخاب آن اقدام نمود:

جدول ۱-۱۰) محاسبه عدد Z برای اساس سطح اطمینان

سطح اطمینان بر اساس عدد Z	
۹۰٪	۱.۶۴۵
۹۵٪	۱.۹۶۰
۹۸٪	۲.۳۳۰
۹۹٪	۲.۵۷۵

$CV_T=CV_S+CV_A=\sigma/\bar{x}$

که در آن:

n = تعداد نمونه

σ = انحراف معیار

CV_T = ضریب تغییرات کل

CV_S = ضریب تغییرات نمونه‌برداری

CV_A = ضریب تغییرات آنالیز

$\bar{x}$ = میانگین

[1] Margin of Error

با توجّه به تعداد n نمونه‌برداری از نمونه‌های استاندارد در غلظت‌های مختلف و محاسبه انحراف معیار (σ) و انتخاب ضریب z مربوط به درصد ضریب اطمینان در یکی از مقادیر ۹۰، ۹۵ و یا ۹۹ درصد، طبق فرمول فوق میزان خطای نمونه‌برداری و آنالیز محاسبه می‌گردد. برای محاسبه SAE هر ترکیب کافی است که میزان خطا بر مقدار PEL یا TLV ترکیب مورد نظر تقسیم گردد و سپس پارامترهای $UCL_{95\%}$ و $LCL_{95\%}$ طبق محاسبات سازمان OSHA به‌شرح زیر ارائه گردد:

الف) میانگین وزن یافته زمانی مواجهه شغلی هشت ساعته برای دفعات مختلف نمونه‌برداری از هر پرسنل با استفاده از فرمول زیر محاسبه می‌گردد.

میانگین وزن یافته زمانی برای شیفت هشت ساعته = $\frac{C1\,T1+C2T2+\cdots..CnTn}{480\,Min}$

ب) با به‌دست آوردن SAE از فرمول میزان خطا و محاسبه نسبت آن به TLV یا PEL ترکیب، مقادیر $UCL_{95\%}$ و $LCL_{95\%}$ با استفاده از فرمول‌های زیر محاسبه می‌گردد:

$UCL_{95\%} = Y + SAE$

$LCL_{95\%} = Y - SAE$

ج) قابل قبول بودن مواجهه شغلی بر اساس استانداردهای تماس شغلی (PEL و یا TLV) از مقایسه مقادیر $UCL_{95\%}$ و $LCL_{95\%}$ با عدد ۱ انجام می‌شود:

د) در شرایط $LCL_{95\%} < 1$ و $UCL_{95\%} > 1$ مواجهه شغلی احتمال دارد بیشتر از TLV باشد و سازمان OSHA توصیه می‌نماید که مجدداً با تعداد یا مدت زمان نمونه‌برداری بیشتر برای محاسبه پارامتر $LCL_{95\%}$ به‌شرح فرمول زیر اقدام گردد:

$$LCL = Y - \frac{SAE\sqrt{T_1^2X_1^2 + T_2^2X_2^2 \ldots T_n^2X_n^2}}{PEL(T_1 + T_2 \ldots T_n)}$$

که در آن:

Y= نسبت میانگین مواجهه فرد بر حدود استاندارد مواجهه

SAE= خطای نمونه‌برداری

T= مدت زمان نمونه‌برداری در دفعات مختلف

X= داده‌های مواجهه‌های شغلی در دفعات مختلف

PEL= حدود استاندارد مواجهه

برای مثال محاسبه مجدد برای تعداد دو نمونه‌برداری فردی به‌منظور پایش میزان مواجهه شغلی با ترکیب کارباریل[1] و SAE برابر با ۰.۲۳، با استفاده از اطلاعات مندرج در جدول ۲-۱۰، به‌صورت زیر انجام می‌شود:

جدول ۲-۱۰) نتایج دو نمونه‌برداری از ترکیب کارباریل

متغیرها	نمونه کارباریل در مرتبه نخست	نمونه کارباریل در مرتبه دوم
گذر حجمی نمونه‌برداری (L/min)	۲	۲
مدت زمان نمونه‌برداری (min)	۲۴۰	۲۴۰
حجم نمونه‌برداری (L)	۴۸۰	۴۸۰
وزن نمونه (mg)	۳.۰۰۵	۲.۸۰۸
غلظت نمونه‌ها (mg/m³)	۶.۲۶	۵.۸۵

$$LCL95\%=(1.21)-\frac{0.23\sqrt{(240\ min)2(6.26\ mg/m3)2+(240\ min)2(5.85\ mg/m3)2}}{5.0\ mg/m3/\ (240\ min+240\ min)}$$

$$LCL95\%= 1.21 - 0.20 = 1.01$$

تفسیر: از آنجایی‌که $LCL95\%$ بیشتر از عدد ۱ است، مواجهه شغلی بیشتر از TLV می‌باشد.

[1] Carbaryl

۱۱- اغلب اوقات یک کارگر در معرض تماس با چند ترکیب شیمیایی به‌طور همزمان است. با توجّه به این حقیقت که مواجهه با ترکیبات شیمیایی در بیشتر اوقات می‌تواند منجر به هم‌افزایی در بروز پیامدهای سلامتی شود، از این‌رو لازم است رویکرد محاسباتی ارزشیابی مواجهه شغلی کارکنان به‌شرح زیر در نظر گرفته شود:

الف) محاسبه ضریب معادل (E_m)[1] در مواجهه با چند ترکیب به‌طور همزمان نسبت به مقادیر PEL و یا TLV های هر یک از ترکیبات با فرمول زیر محاسبه می‌گردد:

$$E_m=\frac{C1}{TLV1}+\frac{C2}{TLV2}+\cdots+\frac{Cn}{TLVn}$$

که در آن:

E_m = مواجهه معادل
C = غلظت

اگر E_m بیشتر از عدد ۱ باشد نشان‌دهنده این است که مواجهه با مجموعه ترکیبات بیشتر از حد مجاز است که در این صورت می‌بایست ارزشیابی مواجهه در مراتب بعدی با در نظر گرفتن SAE های ترکیبات مختلط، انجام شود.

ب) طبق فرمول زیر، نسبت میزان مواجهه با PEL یا TLV برای هر ترکیب محاسبه می‌شود:

$$Y_n=C_n/\mathrm{TLV}_n$$

ج) متغیر R از نسبت Y برای هر ترکیب به E_m محاسبه می‌گردد:

$$R_1=Y_1/E_m \ldots R_n=Y_n/E_m$$

[1] Equivalent Mixture

د) برای پذیرش مواجهه مرکب از چند ترکیب و با در نظر گرفتن SAE هر ترکیب با ضریب اطمینان ۹۵٪، فرمول زیر برای محاسبه ضریب R_{st} به‌کار برده می‌شود:

$$(R_{st})^2 = [(R_1)^2 \times (SAE_1)^2 + (R_2)^2 \times (SAE_2)^2 + \cdots (R_n)^2 \times (SAE_n)^2]$$

ر) سپس با محاسبه R_{st}، دو پارامتر UCL و LCL با دو فرمول زیر محاسبه می‌شود:

$$LCL = 1 - R_{st} \qquad UCL = 1 + R_{st}$$

ز) تفسیر قابل قبول بودن مواجهه شغلی بر اساس استانداردهای تماس شغلی (PEL و یا TLV) از مقایسه مقادیر UCL95% و LCL95% با مقدار E_m انجام می‌شود:

۱) در شرایطی که مقدار E_m کمتر از LCL باشد ($E_m < LCL$)، مواجهه شغلی با ضریب اطمینان ۹۵٪ قابل قبول است.

۲) در شرایطی که مقدار E_m بیشتر یا برابر LCL و همزمان کمتر یا برابر با UCL باشد ($LCL \leq E_m \leq UCL$)، مواجهه شغلی مرکب با ضریب اطمینان ۹۵٪ نمی‌توان در خصوص کمتر یا بیشتر بودن مقدار مواجهه از میزان TLV اظهار نظر نمود و به‌منظور تصمیم‌گیری به تعداد بیشتری از نمونه‌برداری فردی، نیاز است.

۳) در شرایطی که مقدار E_m بیشتر از UCL باشد ($Em>UCL$)، مواجهه با ضریب اطمینان ۹۵٪، بیشتر از PEL و یا TLV است و مواجهه شغلی قابل قبول نمی‌باشد.

برای مثال تطبیق میزان مواجهه همزمان با استانداردهای حد مجاز تماس تنفسی و SAE برای ترکیبات مختلف مندرج در جدول ۳-۱۰، به‌صورت زیر انجام می‌شود:

جدول ۳-۱۰) اطلاعات مواجهه همزمان با سه ترکیب به‌منظور مقایسه با استاندارد PEL

شماره	میزان مواجهه با هر ترکیب*	PEL ترکیبات#	SAE
ترکیب ۱	۵۰۰	۱۰۰۰	۰.۰۸۹
ترکیب ۲	۸۰	۲۰۰	۰.۱۱
ترکیب ۳	۷۰	۲۰۰	۰.۱۸

*: واحد غلظت برای گرد و غبار بر اساس mg/m^3 و برای گازها و بخارات بر اساس ppm یا mg/m^3

E_m معادل برای مواجهه با چند ترکیب با استفاده از فرمول زیر محاسبه می‌شود:

$$E_m = \frac{C1}{TLV1} + \frac{C2}{TLV2} + \cdots + \frac{Cn}{TLVn}$$

E_m= ۵۰۰/۱۰۰۰+۸۰/۲۰۰+۷۰/۲۰۰ =۱.۲۵

زمانی که $E_m > 1$، می‌بایست ارزشیابی مواجهه با در نظر گرفتن SAE های ترکیبات بررسی شود. برای این منظور، با محاسبه نسبت تراکم هر مواجهه $C_n = TLV_n/Y_n$ و $R_n = Y_n/EM$ و در نظر گرفتن SAE هر ترکیب، ضریب R_{st} محاسبه می‌گردد:

$$R_{st} = \sqrt{[(R_1 \times SAE_1)^2 + (R_2 \times SAE_2)^2 + \cdots (R_n \times SAE_n)^2]}$$

R_{st} = √(۰.۴×۰.۰۸۹)۲+(۰.۳۲×۰.۱۱)۲+(۰.۲۸×۰.۱۸)۲ = ۰.۰۷۱

سپس UCL و LCL محاسبه می‌گردد و مقدار E_m در مقایسه با آن تفسیر می‌گردد.

$LCL = 1 - R_{st}$ $UCL = 1 + R_{st}$

Y_1=۵۰۰/۱۰۰۰	Y_2=۸۰/۲۰۰	Y_3=۷۰/۲۰۰
Y_1=۰.۵۰	Y_2=۰.۴۰	Y_3=۰.۳۵
$R_1=Y_1/EM$=۰.۴۰	R_2=۰.۳۲	R_3=۰.۲۸

$UCL=1+R_{st}$ = ۱.۰۷۱ Em = ۱.۲۵

با توجّه به بزرگ‌تر بودن عدد UCL از عدد واحد، مواجهه شغلی همزمان با ترکیبات مورد بررسی، قابل قبول نمی‌باشد.

بخش ضمائم

ضمیمه شماره- ۱

نحوه تهیه نمونه‌های استاندارد در آزمایشگاه و محاسبه انحراف معیار و ضریب تغییرات برای هر غلظت و محاسبه میانگین ضریب تغییرات برای محدوده غلظتی خطی (Linear Range Concentration).

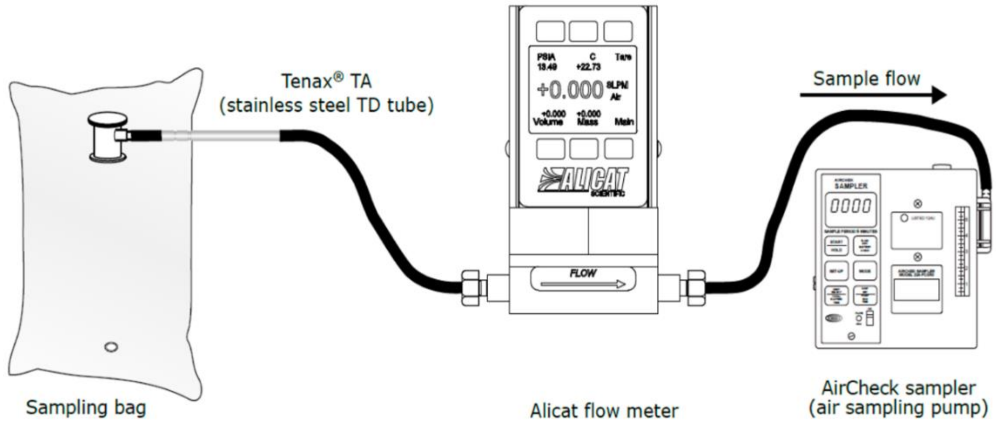
❖ **تهیّه تراکم آلاینده‌های هوا در دامنه خطی نمودار کالیبراسیون برای حداقل ۳ مورد از تراکم‌های کم، متوسط و زیاد**

- **نمونه‌برداری از هر سه گروه از کیسه‌های تدلار به تعداد ۳ الی ۵ بار**
- **آنالیز نمونه‌های برداشته شده توسط روش مرجع**
- **محاسبه میانگین تراکم برای هر گروه از تراکم‌ها**
- **محاسبه انحراف معیار برای هر گروه از تراکم‌ها**

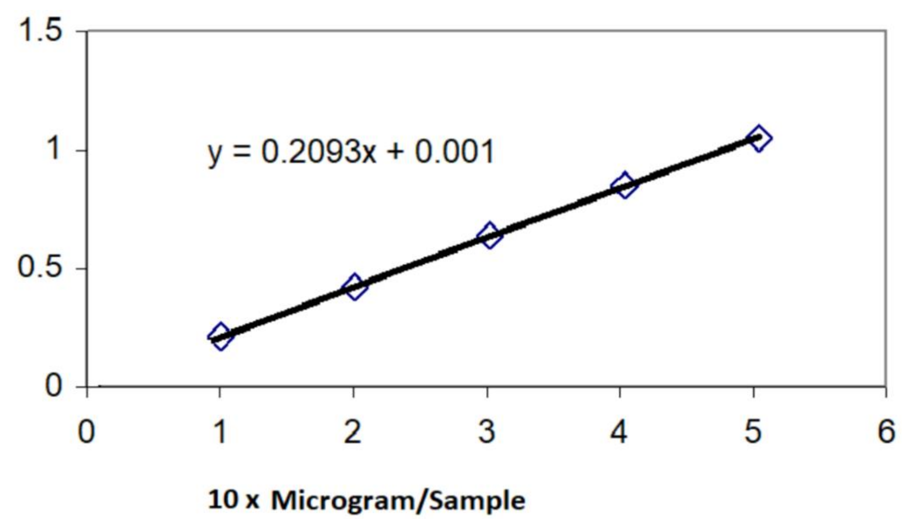


شکل ۲-۱۰) ساخت غلظت‌های معینی از ترکیب از طریق تزریق آن توسط میکروسرنگ در کیسه‌های تدلار و محاسبه خطاهای نمونه‌برداری و آنالیز

❖ **نمونه‌برداری از کیسه تدلار در تراکم ثابت کم، متوسط و زیاد برای گازها و بخارات**



شکل ۳-۱۰) نحوه استخراج استانداردهای کاری ترکیبات شیمیایی اتمسفریک تهیّه شده در کیسه‌های تدلار توسط لوله‌های جاذب



شکل ۴-۱۰) خط کالیبراسیون تهیّه شده برای استانداردهای کاری
(محور Y: مساحت زیر پیک، محور X: غلظت نمونه یا جرم بر نمونه)

❖ **محاسبه خطای نمونه‌برداری و آنالیز**

$X \pm Z \times \sigma/\sqrt{n}$

X = میانگین آنالیز یک استاندارد | **Z = ضریب اطمینان**

σ = انحراف معیار | **n = از یک نمونه استاندارد تعداد نمونه‌برداری**

❖ **محاسبه دامنه تراکم به‌صورت UCL و LCL با ضریب اطمینان ٪۹۵**

$$\text{Upper 95\% Limit (UCL)} = X + 1.96\ \sigma/\sqrt{n}$$
$$\text{Lower 95\% Limit (LCL)} = X - 1.96\ \sigma/\sqrt{n}$$

❖ **تفسیر نتایج داده‌های نمونه‌برداری و آنالیز**

UCL < TLV = تخلفی در مورد مواجهه کارگران واقع نشده است.

LCL < TLV وUCL > TLV = احتمالاً مواجهه کارگران بیشتر از TLV است.

LCL > TLV = در این شرایط به احتمال ٪۹۵، مواجهه شغلی بیشتر از TLV است و تخلف از سوی کارفرما در خصوص کنترل آلاینده‌های محیط کار رخ داده است.

۱۰–۱–۲) برنامه‌ریزی برای آلاینده‌سنجی سالیانه از مراکز صنعتی

در نهایت در جمع‌بندی مطالب گفته شده می‌توان گفت که در برنامه‌ریزی برای آلاینده‌سنجی از مراکز صنعتی توسط یک متخصص بهداشت حرفه‌ای، می‌بایست مراحل زیر در نظر گرفته شود:

۱) شناسایی صنعت و مواجهه شغلی کارکنان با ترکیبات شیمیایی از متون علمی و سایت‌های تخصصی مهندسی بهداشت حرفه‌ای (به فصل‌های ۱ و ۲ مراجعه شود)

۲) تشخیص گروه‌های SEG در صنعت و ارزیابی ریسک کیفی آنها (به فصل‌های ۲، ۳ و ۴ مراجعه شود)

۳) اعلام ترکیبات شیمیایی مهم (حداقل دو مورد) و اثرات بالقوه ترکیبات یاد شده (به فصل‌های ۳ و ۴ مراجعه شود)

۴) انتخاب روش(های) استاندارد از سازمان‌های NIOSH و یا OSHA برای ارزشیابی مواجهه شغلی (به فصل‌های ۵ تا ۸ مراجعه شود)

۵) برنامه‌ریزی برای ارزیابی ریسک کیفی و سپس ارزشیابی مواجهه شغلی تماس شغلی کارکنان بر اساس رویکرد آماری (به فصل ۹ مراجعه شود)

۶) تفسیر داده‌های مواجهه شغلی کارکنان گروه‌های SEG و مطابقت آنها با OEL یا TLV ترکیبات (به فصل‌های ۹ و ۱۰ مراجعه شود)

منابع و مراجع اطلاعاتی

Bayatian M, Azari MR, Ashrafi K, Jafari MJ, Mehrabi Y. CFD simulation for dispersion of benzene at a petroleum refinery in diverse atmospheric conditions. Environmental Science and Pollution Research. 2021; 28:32973-32984.

Bayatian M, Ashrafi K, Azari MR, Jafari MJ, Mehrabi Y. Risk assessment of occupational exposure to benzene using numerical simulation in a complex geometry of a reforming unit of petroleum refinery. Environmental Science and Pollution Research. 2018; 25:11364-75.

Drolet D, Beauchamp G. Sampling guide for air contaminants in the workplace. 8th Eddition. October, 2012. IRSST publication.

Safe Work Australia. Guidance Interpretation Workplace Exposure Standards Airborne Contaminants. April, 2013. Available from: https://www.safeworkaustralia.gov.au/system/files/documents/1705/guidance-interpretation-workplace-exposure-standards-airborne-contaminants-v2.pdf

United States. Occupational Safety, Health Administration. Office of Science, Technology Assessment. OSHA Technical Manual. US Department of Labor, Occupational Safety and Health Administration, Office of Science and Technology Assessment. 1999.

Qualitative Risk Assessment and Evaluation of Workers’ Exposure to Hazardous Chemical Compounds in Industrial, Agriculture, and Service Sectors



Authors

Dr. Mansour Rezazadeh-Azari
Professor at Tehran Islamic Azad University of Medical Sciences

Dr. Athena Rafieepour
Assistant Professor at Iran University of Medical Sciences